

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Д. Д. Татарчук, В. М. Коваль

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ, ПРИЛАДІВ ТА ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ-3 КУРСОВА РОБОТА

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра,
які навчаються за освітньою програмою «Мікро- та наноелектроніка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Рецензенти: *Казміренко В. А., к.т.н., доц.*

Відповідальний

редактор *Борисов О. В., к.т.н., проф.*

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №9 від 30.05.2019 р.)

за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол № 04/2019 від 26.04.2019 р.)

Електронне мережне навчальне видання

Татарчук Дмитро Дмитрович, канд. техн. наук, доц.

Коваль Вікторія Михайлівна, канд. техн. наук, доц.

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ, ПРИЛАДІВ ТА ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ-3 КУРСОВА РОБОТА

Моделювання технологій напівпровідникових матеріалів, приладів та інтегральних мікросхем-3: Курсова робота [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра, які навчаються за освітньою програмою «Мікро- та наноелектроніка» / Д. Д. Татарчук, В. М. Коваль; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,00 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 90 с.

Виконання курсової роботи є заключним етапом вивчення теоретичної частини курсу “Моделювання технологій напівпровідникових матеріалів, приладів та інтегральних мікросхем”. При виконанні курсової роботи студент отримує практичні навички у розробці інтегральних мікросхем та технологічного маршруту їх виготовлення. Посібник містить необхідні теоретичні відомості та рекомендації щодо порядку виконання розрахункової частини роботи, приклади розрахунку базових елементів мікросхем та технології їх виготовлення, а також загальні вимоги щодо оформлення та захисту курсової роботи.

© Д.Д. Татарчук, В.М. Коваль, 2019

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 4 |
| ПЕРЕДМОВА..... | 7 |
| 1. ЗМІСТ, ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ ТА ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ..... | 10 |
| 2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ДЛЯ ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ... | 14 |
| 2.1. Фізичні основи роботи МДН елементів інтегральних мікросхем... | 14 |
| 2.2. Технологічні основи виготовлення напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем..... | 26 |
| 3. ПРОЕКТУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ | 44 |
| 3.1. Вибір принципової електричної схеми інтегральних логічних елементів..... | 44 |
| 3.2. Розрахунок електричних характеристик інтегральних логічних елементів..... | 57 |
| 3.3. Розробка технології виготовлення інтегральної мікросхеми..... | 64 |
| 3.4. Розрахунок параметрів технологічних процесів для виготовлення інтегральної мікросхеми..... | 79 |
| 4. ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ КУРСОВОЇ РОБОТИ..... | 82 |
| ДОВІДКОВІ ДАНІ | 86 |
| ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ..... | 87 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВАХ – вольт-амперна характеристика;
ІЧ – інфрачервоний;
КДБ – кремній, легований бором;
КЕФ – кремній, легований фосфором;
УФ – ультрафіолет;
ВФХ – вольт-фарадна характеристика;
ІС – інтегральна мікросхема;
ІМС – інтегральна мікросхема;
МДН – метал-діелектрик-напівпровідник;
МОН – метал-оксид-напівпровідник;
ОПЗ – область просторового заряду;
ВЗ – валентна зона;
ЗЗ – заборонена зона;
ЗП – зона провідності;
ЕРС – електрорушійна сила;
НП – напівпровідник;
 A_m – робота виходу електронів з металу;
 A_n – робота виходу електронів з напівпровідника;
С – ємність;
 C_d – ємність діелектрика;
 C_{FB} – ємність плоских зон;
 C_s – приповерхнева ємність напівпровідника;
 d_{OPZ} – товщина збідненого шару;
 d – товщина діелектрика;
 f – частота тестового сигналу;
 Q_{ss} – повний заряд поверхневих станів;
 q – елементарний заряд електрона;
 U_{FB} – напруга плоских зон;

$\Phi_{\text{кон}}$ – контактна різниця потенціалів;
 Φ_T – температурний потенціал;
 ψ_B – різниця положення рівня Фермі у власному та заданому напівпровіднику;
 χ – спорідненість напівпровідника до електрону;
 ε – діелектрична проникність;
 ε_0 – діелектрична стала;
 ε_d – діелектрична проникність діелектрика;
 ρ – питомий опір;
 T – абсолютна температура;
 N_D, N_A – концентрація донорів, акцепторів;
 n_i, p_i – власна концентрація електронів дірок;
 n_n – концентрація електронів у n – області;
 n_p – концентрація електронів у p – області;
 p_n – концентрація донорів у n – області;
 p_p – концентрація донорів у p – області;
 τ_p, τ_n – середня тривалість життя електрона, дірки;
 D_p, D_n – коефіцієнти дифузії дірок, електронів;
 k – стала Больцмана;
 μ_n, μ_p – рухомість електронів, дірок;
 U_K – контактна різниця потенціалів;
 $U_{\text{пр}}$ – пряма напруга;
 $U_{\text{зв}}$ – зворотна напруга;
 $I_{\text{пр}}$ – прямий струм;
 $I_{\text{зв}}$ – зворотний струм;
 $C_{\text{бар}}$ – бар'єрна ємність;
 $C_{\text{диф}}$ – дифузійна ємність;
 E – напруженість електричного поля;

σ – питома електропровідність;

$U_{\text{пор}}$ – порогова напруга;

$U_{\text{вх}}$ – вхідна напруга інвертора;

$U_{\text{вих}}$ – вихідна напруга інвертора;

$U_{\text{жив}}$ – напруга живлення схеми;

$U_{\text{пор}}^a$ – порогова напруга активного транзистора інвертора;

$U_{\text{пор}}^n$ – порогова напруга пасивного транзистора інвертора;

β_a – питома крутизна активного транзистора інвертора;

β_n – питома крутизна пасивного транзистора інвертора;

I_c – струм на стоці МДН транзистора;

U_c – напруга на стоці МДН транзистора;

U_z – напруга на затворі МДН транзистора;

W – ширина каналу;

L – довжина каналу;

U^1 – напруга логічної одиниці інвертора;

U^0 – напруга логічного нуля інвертора;

$U_{\text{жив}}$ – напруга живлення інвертора;

I_n – струм навантаження інвертора.

ПЕРЕДМОВА

Головною задачею мікроелектроніки є створення інтегральних мікросхем з мінімальними розмірами структурних елементів, високим ступенем інтеграції, стабільністю властивостей і характеристик та високою надійністю. Мікроелектроніка дозволяє вирішити проблеми різкого підвищення надійності електронної апаратури, значного зменшення її габаритів, маси, споживаної енергії і вартості. В мікроелектроніці відмовляються від застосування дискретних радіокомпонентів. Використовуючи досягнення фізики твердого тіла та технології надчистих матеріалів в мікрооб'ємах твердого тіла формують складні електронні вузли – інтегральні мікросхеми.

Інтегральною мікросхемою називають мікроелектронний виріб, що виконує певну функцію перетворення і оброблення сигналів і має високу щільність пакування електрично з'єднаних елементів (або елементів і компонентів) і кристалів, які з точки зору вимог до випробування, приймання, поставки і експлуатації розглядається як єдине ціле. Щільність пакування елементів в мікросхемі може досягати сотень тисяч елементів в одному кристалі.

Часто замість терміну інтегральна мікросхема (ІМС) використовуються терміни інтегральна схема (ІС) або просто мікросхема. Інтегральна мікросхема містить елементи і компоненти.

Елементом інтегральної мікросхеми називається частина ІМС, що реалізовує функцію якого-небудь простого електрорадіоелементу (наприклад, транзистора, діода, резистора, конденсатора). Ця частина виконана нероздільно від кристала ІМС. Елемент не може бути відокремлений від ІМС як самостійний виріб, тому його не можна випробувати, упакувати і експлуатувати.

Компонентом інтегральної мікросхеми також називається частина ІМС, що реалізовує функції якого-небудь електрорадіоелементу. Проте ця частина

перед монтажем була самостійним виробом в спеціальній упаковці (комплектуючий виріб). Компонент у принципі може бути відокремлений від виготовленої ІМС.

В даний час широкого розповсюдження набули інтегральні мікросхеми на основі МДН транзисторів. На основі МДН технології створюються схеми середнього (реєстри, лічильники, суматори тощо), великого та надвеликого ступеня інтеграції (постійні та оперативні запам'ятовуючі пристрої, мікропроцесори тощо).

Мікросхеми на МДН-транзисторах мають відносно просту конструкцію та технологію виготовлення, забезпечують високий відсоток виходу придатних і не потребують додаткової ізоляції елементів в схемі. В основі виготовлення мікросхем на МДН транзисторах, як і біполярних мікросхем, лежить планарна технологія, однак кількість технологічних операцій, необхідних для виготовлення мікросхем на МДН транзисторах, є значно меншою. Крім того, МДН транзистори мають менший розмір порівняно з біполярними елементами, що дає змогу значно підвищити ступінь інтеграції. Мікросхеми на МДН транзисторах містять до 500 000 елементів на одному кристалі, і цей показник продовжує зростати. Проте за швидкодією такі мікросхеми поступаються схемам на біполярних транзисторах.

Структури метал-діелектрик-напівпровідник, що використовуються в якості елементів МДН мікросхем, можуть виконувати функції підсилення, генерації та перетворення електричних сигналів, тобто ті ж функції, що виконують біполярні транзистори. Поряд з тим МДН транзистори можна використовувати в якості резисторів та конденсаторів, номінальні параметри яких змінюються в заданих межах при зміні прикладеного потенціалу до керуючого електрода. Крім того, МДН структури можуть виконувати функції елементів пам'яті.

Значного поширення МДН транзистори набули в цифрових мікросхемах. Це обумовлено простотою їх конструкції, гарними характеристиками перемикання, багатофункціональністю, само

ізолюваністю, малими розмірами, а також низьким рівнем потужності, що споживається. Цифрові МДН мікросхеми містять, як правило, лише МДН транзистори, оскільки функції пасивних елементів можуть ефективно виконувати самі МДН транзистори. МДН мікросхеми представляють собою схеми з безпосередніми зв'язками, тому в таких схемах відсутні конденсаторні зв'язки.

Для виготовлення напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем використовується планарна технологія. Технологія ІМС представляє собою сукупність механічних, фізичних та хімічних способів обробки напівпровідникових діелектриків та металів, у результаті яких створюється готова мікросхема.

Технологічним процесом мікроелектроніки називається процес виготовлення ІМС із окремих матеріалів та який складається з ряду послідовних технологічних та конструкторських операцій.

Технологічна операція – це закінчена частина технологічного процесу, виконана на одному робочому місці та обладнанні. У процесі виконання кожної технологічної операції відбувається формування структури ІМС.

Дана курсова робота – заключний етап вивчення теоретичної частини курсу “Моделювання технології напівпровідникових матеріалів, приладів та інтегральних мікросхем”.

При виконанні курсової роботи студент отримує та закріплює навички самостійного розв'язку інженерних задач мікроелектроніки, роботи з технічною та довідниковою літературою.

В даних методичних вказівках викладено: завдання курсової роботи по варіантах, теоретичні відомості та методичні вказівки щодо проектування МДН-елементів з прикладами розрахунку, а також вимоги до змісту, оформлення та захисту розрахунково-пояснювальної записки.

1. ЗМІСТ, ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ ТА ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Курсова робота являє собою розробку та розрахунок логічного елемента, що виконує вказану логічну функцію згідно табл.1, на основі інтегрального елемента, що вказаний у табл.2, розробку технології виготовлення, необхідної для реалізації таких елементів та розрахунок параметрів технологічних процесів, вказаних у табл.3. Завдання на курсову роботу містить параметри логічного елемента згідно варіанту (табл.. 1-3).

Таблиця 1. Вихідне завдання на курсову роботу (логічна функція та електричні параметри інвертора)

| Номер вихідного завдання | Логічна функція інвертора, $y = f(x_1, x_2)$ | Рівень логічної одиниці, В | Напруга живлення, В | Струм навантаження, мкА |
|--------------------------|---|----------------------------|---------------------|-------------------------|
| 1 | $y = \overline{x_1 \cdot x_2}$ | 4 | 8 | 90 |
| 2 | $y = \overline{x_1 + x_2}$ | 3 | 6 | 100 |
| 3 | $y = \overline{x_1 \cdot x_2}$ | 5 | 10 | 60 |
| 4 | $y = \overline{x_1 + x_2}$ | 6 | 12 | 80 |
| 5 | $y = \overline{x_1 \cdot x_2}$ | 7 | 9 | - |
| 6 | $y = \overline{x_1 + x_2}$ | 8 | 10 | - |
| 7 | $y = \overline{x_1 \cdot x_2}$ | 5 | 8 | - |
| 8 | $y = \overline{x_1 + x_2}$ | 9 | 12 | - |

Таблиця 2. Різні способи структурної реалізації вихідного завдання курсової роботи (способи побудови інвертора)

| Спосіб побудови інвертора | Тип активного елементу | Тип провідності каналу активного елементу | Тип схеми МДН інвертора |
|---------------------------|---------------------------------------|--|---|
| I, II | МДН-транзистор з індукованим каналом | n –тип – непарні варіанти (I) p-тип – парні варіанти (II) | Схема з нелінійним резистором |
| III, IV | МДН-транзистор з індукованим каналом | n –тип – непарні варіанти (III) p-тип – парні варіанти (IV) | Схема з струмо-стабілізуючим резистором |
| V, VI | МДН-транзистор з вбудованим каналом | n –тип – непарні варіанти (V) p-тип – парні варіанти (VI) | Схема з струмо-стабілізуючим резистором |
| VII, VIII | МДН-транзистор з вбудованим каналом | n –тип – непарні варіанти (VII) p-тип – парні варіанти (VIII) | Схема з нелінійним резистором |
| IX, X | МДН- транзистор з індукованим каналом | n –тип – непарні варіанти (IX) p-тип – парні варіанти (X) | Схема на комплементарних транзисторах |

Таблиця 3. Варіанти курсової роботи, розподілені по номерах вихідного завдання та способам його структурної реалізації

| Номер вихідного завдання | Спосіб структурної реалізації вихідного завдання | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X |
| 1 | 1 | 19 | 7 | 22 | - | - | - | - | - | - |
| 2 | 13 | 4 | 16 | 10 | - | - | - | - | - | - |
| 3 | - | - | - | - | 5 | 17 | 11 | 14 | - | - |
| 4 | - | - | - | - | 20 | 8 | 23 | 2 | - | - |
| 5 | - | - | - | - | - | - | - | - | 3 | 21 |
| 6 | - | - | - | - | - | - | - | - | 24 | 12 |
| 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | 9 | 15 |
| 8 | - | - | - | - | - | - | - | - | 18 | 6 |

Таблиця 3. Розраховуваний технологічний метод виготовлення інвертора для різних варіантів курсової роботи

| Номери варіантів | Технологічна операція | Технологічний метод | Розраховуваний параметр |
|---------------------|--------------------------------------|----------------------------|--|
| I, II, III, IV | Формування підзатворного діелектрика | Термічне окислення кремнію | Час та температура окиснення |
| V, VI, VII, VIII | Легування області каналу | Іонна імплантація | Доза та час легування, енергія іонів |
| IX, X | Формування кишень транзистора | Дифузія | Температура та час процесу загонки та розгонки |

Виконання курсової роботи доцільно виконувати у наступному порядку.

1. Вивчити завдання на курсову роботу.
 2. Скласти бібліографію для виконання курсової роботи. При цьому необхідно використовувати не лише основну літературу, вказану викладачем, але й знайти додаткову. Повний список літератури необхідно узгодити з керівником.
 3. Скласти календарний план роботи та узгодити його з керівником. На виконання роботи відводиться 10 – 12 тижнів. З них перші два тижні – для організаційної роботи, а останні два – для оформлення та захисту роботи.
 4. Розробити принципову електричну схему логічного елемента МДН або КМДН інвертора.
 5. Розрахувати окремі інтегральні елементи схеми згідно завдання.
 6. Розробити та обґрунтувати технологію виготовлення МДН або КМДН інвертора.
 7. Розрахувати параметри вказаних у завданні технологічних процесів, що використовуються для виготовлення МДН або КМДН інвертора.
 8. Оформити пояснювальну записку згідно вимог, наведених у розділі 4, та підготуватись до захисту курсової роботи.
- В процесі виконання окремих етапів календарного плану потрібно консультуватися з керівником курсової роботи.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ДЛЯ ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

2.1. Фізичні основи роботи МДН елементів інтегральних мікросхем

Багатошарові структури метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-структури) пов'язані з розвитком планарної технології і лежать в основі напівпровідникових пристроїв, в яких використовується ефект поля: пристроїв з зарядовим зв'язком, польових транзисторів з ізольованим затвором і т.д. МДН-структури широко використовуються для дослідження фізичних процесів на межі поділу діелектрика з напівпровідниками.

Найпростіша МДН-структура представляє собою багатошарову структуру, що містить монокристалічну пластину напівпровідника з омичним контактом, на вільну планарну поверхню якої нанесений шар діелектрика, покритий металічним електродом (рис. 1.14).

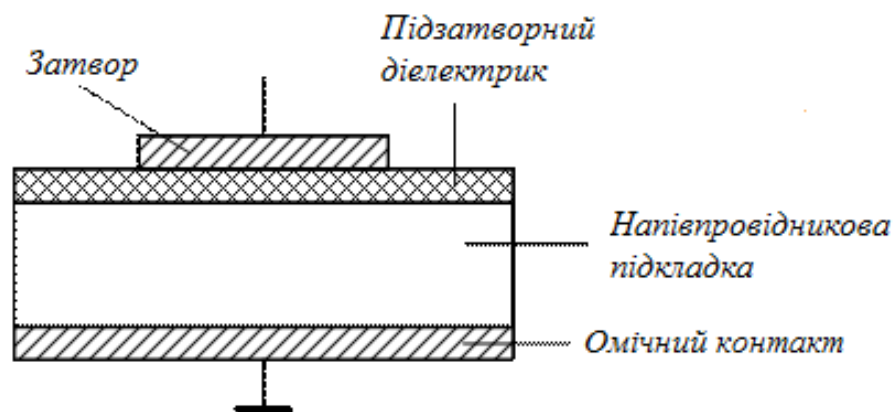


Рисунок 1.14 – Структура метал-діелектрик-напівпровідник

Найчастіше в якості напівпровідника в МДН-структурах використовують кремній, а роль діелектрика виконує діоксид кремнію (SiO_2), тому для МДН-структур вживається також назва МОН-структури (метал-оксид-напівпровідник). Товщина підзатворного шару діелектрика може варіюватись в діапазоні від 15-20 до $1-2 \cdot 10^3$ Å, а лінійні розміри МДН-

структур вздовж поверхні підкладки складають величини від декількох мікрон до декількох міліметрів та більше.

Найпростіша МДН-структура представляє собою МДН-конденсатор, ємність якого залежить від напруги між електродами. Напруга, прикладена до МДН-структури вважається позитивною, якщо на затвор подано позитивний потенціал відносно омічного контакту до підкладки, і негативним, якщо на затвор відносно омічного контакту до підкладки подано негативний потенціал.

При аналізі МДН-структур широко використовують модель ідеальної МДН-структури, для якої характерні наступні припущення:

1) термодинамічні роботи виходу електронів з металу і напівпровідника однакові, тому при відсутності зовнішнього електричного поля енергетичні зони напівпровідника не вигнуті (стан плоских зон);

2) поверхневі стани на межі поділу напівпровідник-діелектрик, а також заряджені частинки в шарі діелектрика відсутні, тому при дії будь-яких зовнішніх електричних полів виникають тільки заряд в підкладці і рівний йому по величині заряд протилежного знаку на затворі;

3) при дії постійної зовнішньої напруги будь-якої величини відсутній перенос носіїв заряду через шар діелектрика, тобто опір діелектрика постійному струму нескінченно великий.

МДН-структури, близькі до ідеальних, отримують, використовуючи “хлорну” технологію термічного вирощування двоокису кремнію на кремнії, причому для кремнію n-типу в якості матеріалу затвора використовують алюміній, а для кремнію p-типу використовують золото.

МДН-структури, для яких не виконується хоча б одне з вище перелічених допущень, називаються реальними МДН-структурами.

Зонні енергетичні діаграми ідеальної МДН-структури в рівноважних умовах представлені на рис.1.15

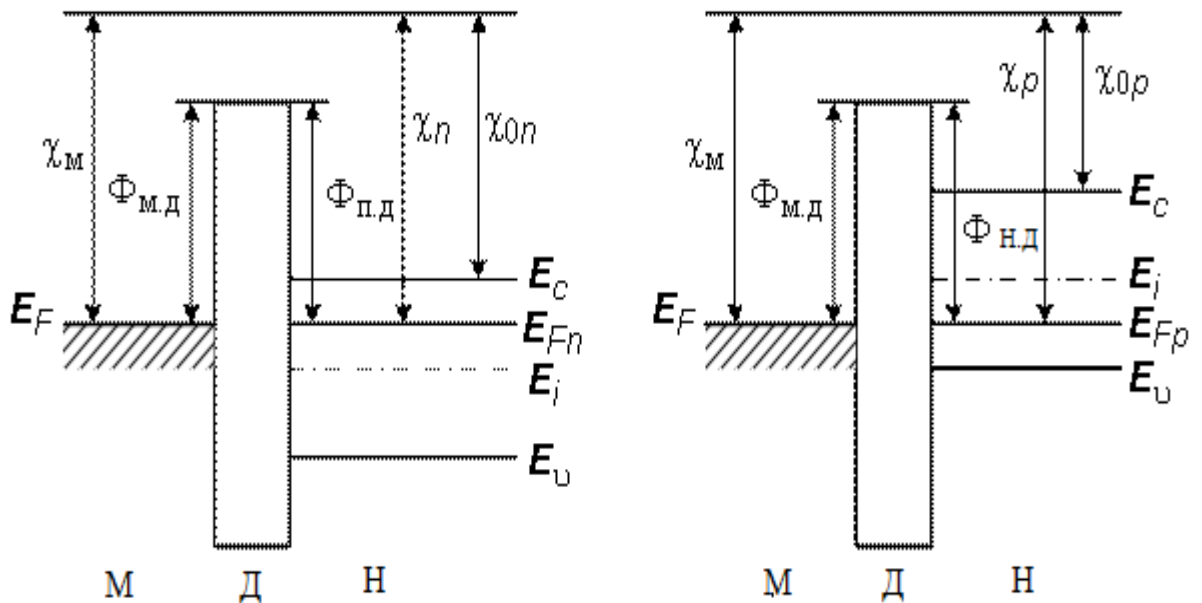


Рисунок 1.15 – Зонні енергетичні діаграми ідеальної МДН-структури в рівноважних умовах

При подачі на МДН-структуру зовнішньої напруги під затвором виникає електричне поле. Так як в ідеальному діелектрику відсутні незв'язані заряди, електричне поле в ньому не екранується, а проникає в приповерхневий шар підкладки, де викликає зміну концентрації носіїв заряду. В залежності від полярності і величини прикладеної напруги, приповерхневий шар підкладки виявляється або в режимі збагачення, збіднення, або інверсії.

Якщо на МДН-структуру подано позитивну напругу, напруженість електричного поля направлена від затвору до підкладки. В напівпровіднику n-типу таке поле притягує вільні електрони з об'єму напівпровідника до межі поділу напівпровідник-діелектрик. В результаті в приграничній області напівпровідника виникає об'ємний негативний заряд, який внаслідок дифузійного вирівнювання концентрації електронів розташовується в шарі кінцевої товщини, що називається областю просторового заряду (ОПЗ).

Так як концентрація основних носіїв заряду (електронів) в ОПЗ більша, ніж в об'ємі кристалу, то ОПЗ являється збагаченим шаром, а МДН-

структура знаходиться в режимі збагачення. Електричне поле зменшує величину потенціальної енергії електронів в ОПЗ, в порівнянні з енергією електронів в об'ємі напівпровідника, тому краї енергетичних зон в ОПЗ вигнуті вниз, тобто на межі поділу напівпровідника і діелектрика для електронів утворюється потенціальна яма (рис. 1.16). В шарі діелектрика через відсутність об'ємного заряду напруженість електричного залишається сталою, тому енергія електронів при переході від затвору до напівпровідника збільшується по лінійному закону.

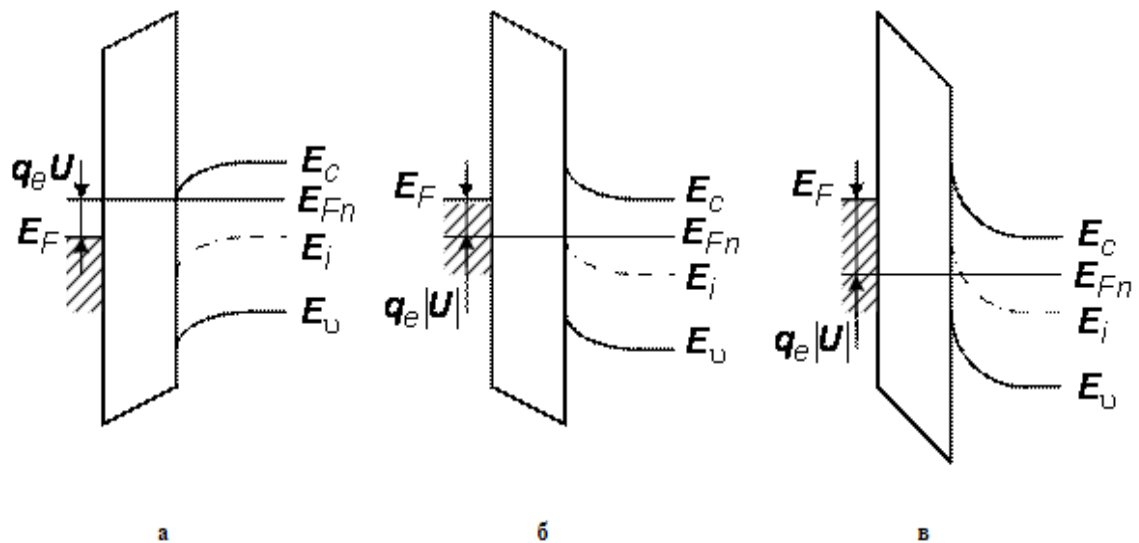


Рисунок 1.16 – Зонні енергетичні діаграми МДН-структур з напівпровідником n-типу в режимі збагачення (а), збіднення (б) та інверсії (в)

При подачі на МДН-структуру від'ємної напруги напруженість електричного поля направлена від підкладки до затвору. Якщо в якості підкладки використовується напівпровідник n-типу, то електричне поле відштовхує електрони від межі поділу напівпровідник-діелектрик в глибокий об'єм напівпровідника. Коли прикладена від'ємна напруга невелика, в приграничній області напівпровідника виникає об'ємний позитивний заряд, утворений некомпенсованими іонами донорної домішки. Так як концентрація основних носіїв заряду (електронів) в ОПЗ менша, ніж в об'ємі кристалу, то ОПЗ являється збідненим шаром, а МДН-структура знаходиться в режимі збіднення. Електричне поле викликає збільшення потенціальної енергії

електронів в ОПЗ, в порівнянні з енергією електронів в об'ємі напівпровідника, тому краї енергетичних зон в ОПЗ вигнуті вверху, тобто у межі поділу напівпровідника і діелектрика для електронів утворюється потенціальний бар'єр (рис. 1.16, б). В шарі діелектрика енергія електронів при переході від затвору до напівпровідника зменшується по лінійному закону.

При великих від'ємних напругах енергетичні зони викривляються вверху настільки сильно, що поблизу границі напівпровідника і діелектрика рівень Фермі перетинає середину забороненої зони. В цьому випадку дірки витісняються з об'єму напівпровідника до межі поділу з діелектриком, утворюючи приграничний заряджений шар, в якому дірки стають основними, а електрони – неосновними носіями заряду. Через інверсію електропровідності даний шар називається інверсним. При утворенні інверсного шару МДН-структура знаходиться в режимі інверсії. При цьому в ОПЗ напівпровідника існує два шари: інверсний і збіднений (рис. 1.16, в).

Ємність МДН-структури, або ємність затвору, представляє собою послідовне з'єднання ємності діелектрика C_d і приповерхневої ємності напівпровідника C_s . Графік реальної залежності ємності затвору від напруги на затворі показаний на рис. 1.17. Така крива називається вольт-фарадною характеристикою МДН-структури.

Якщо $U_3 > 0$ і напівпровідникова підкладка має електронний тип провідності, то поблизу поверхні напівпровідника накопичуються електрони. Приповерхневий шар напівпровідника при цьому можна розглядати як металічну пластину, а питому ємність затвора вважати рівною ємності діелектрика:

$$C_3 = C_d = \epsilon_0 \epsilon_A / a \quad (1.5)$$

При переході МДН-структури в режим збіднення ($U_3 < 0$) утворюється ОПЗ і починає даватись вплив приповерхневої ємності C_3 , значення якої залежить від напруги на затворі.

При перевищенні U_3 значення порогової напруги в МДН-структурі відбувається інверсія провідності приповерхневого шару: поверхнева концентрація дірок в інверсному шарі росте експоненціально з напругою, а поверхневий потенціал збільшується пропорційно квадрату товщини збідненої області l_0 . Після того як значення l_0 досягає максимальної величини, подальший приріст негативного заряду на затворі буде компенсуватися зростанням концентрації дірок в каналі.

Поява надлишкових дірок забезпечується достатньо повільною генерацією електронно-діркових пар в ОПЗ. Тому, якщо до постійної напруги U_3 додається мала змінна напруга dU_3 з високою частотою, концентрація дірок в каналі не встигає змінюватися з частотою змінної напруги і ємність МДН-структури залишається сталою (рис. 1.17, крива 1).

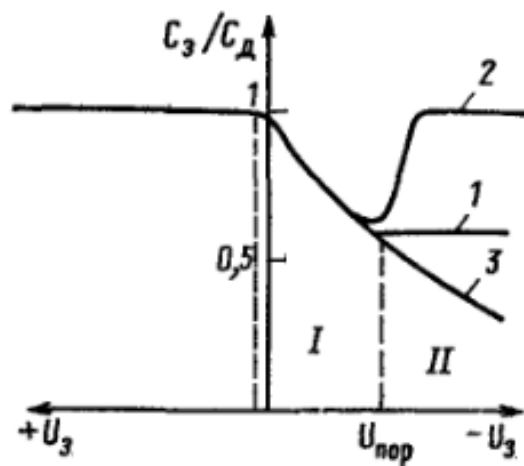


Рисунок 1.17 – Вольт-фарадна характеристика МДН-структури в режимі збіднення і інверсії

Якщо ж частота зміни U_3 низька, то концентрація дірок змінюється, і ємність затвору наближається до ємності діелектрика (рис. 1.17, крива 2).

При подачі імпульсу напруги на затвор, його ємність і загальна ємність МДН-структури буде зменшуватися (рис. 1.17, крива 3).

На рис. 1.18 зображена вольт-фарадна характеристика МДН-структури з підкладкою р- і n-типу.

МДН ємності (або варікапи) характеризуються високими значеннями вхідного опору, добротності, коефіцієнта перекриття по ємності і працюють при будь-якій полярності напруги. Для досягнення значних величин перекриття по ємності і крутизни вольт-ємнісної характеристики в МДН пристроях необхідно використовувати діелектричні матеріали з високими значеннями діелектричної проникності, до яких зокрема відносяться оксид кремнію і оксиди рідкоземельних елементів. Підзатворний діелектрик МДН структури повинний задовольняти наступним вимогам:

- бути термодинамічно стійким в контакті з напівпровідником;
- дифузія кисню не повинна призводити до утворення шару змінного складу, або у випадку наявності цього шару, його товщина не повинна бути меншою, ніж товщина SiO_2 ;
- оксиди повинні формувати поверхню поділу з Si високої якості, з невеликою кількістю поверхневих станів і дефектів в межах ширини забороненої зони.

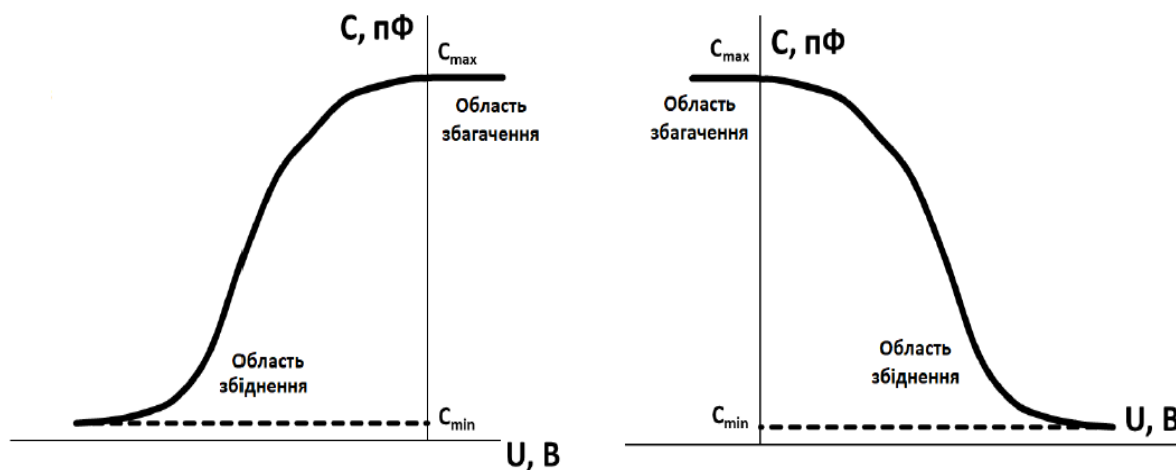


Рисунок 1.18 Вольт-фарадні характеристики для напівпровідника р-типу (а) та n-типу (б)

В якості діелектричної плівки у варікапах можуть використовуватись: DyO_2 , Gd_2O_3 , Sm_2O_3 , Ce_2O_3 , Yb_2O_3 , SiO_2 , тощо. Оксиди рідкоземельних елементів у МДН структурах, як правило, характеризуються високою

стабільністю діелектричних і електричних властивостей, високою діелектричною проникністю (8 – 28), хімічною стійкістю, а також великою шириною забороненої зони.

Наприклад, МДН варікапи з двошаровою діелектричною плівкою DyO_2 – Gd_2O_3 характеризуються коефіцієнтом перекриття по ємності $K = 8 - 12$, і щільністю поверхневих станів $5,6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ eV}^{-1}$. Для МДН варікапів з діелектричною плівкою Sm_2O_3 коефіцієнт перекриття по ємності становив 4-6, а щільність поверхневих станів – $3,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ eV}^{-1}$. МДН варікапи з плівкою CeO_2 характеризувались щільністю поверхневих станів від $1,58 \cdot 10^{11}$ до $2,02 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ eV}^{-1}$. Для МДН варікапів з діелектричною плівкою Yb_2O_3 коефіцієнт перекриття ємності становив 2,5 – 3, а щільність поверхневих станів – $(1-2) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ eV}^{-1}$.

МДН транзистори поділяються на два види: МДН транзистори з індукованим каналом та МДН транзистори вбудованим каналом.

Будова МДН транзистора з індукованим каналом p – типу зображена на рисунку 4.12. У напівпровіднику n – типу (підкладці) дифузійним способом створені дві збагачені p^+ – області, які не мають між собою електричного зв'язку, бо відділені одна від одної зустрічними p - n – переходами. Одна з цих областей є витоком, інша – стоком. Металева пластина, відділена від поверхні підкладки ізолюючим шаром двоокису кремнію, відіграє роль затвора.

Принцип дії МДН транзистора з індукованим каналом полягає в наступному. При $U_{зг}=0$ і ненульовій напрузі стоку (рис. 4.12, а) між витоком і стоком проходить малий зворотний струм p - n – переходу. Транзистор закритий. Якщо тепер до металевого затвора прикласти відносно підкладки негативну напругу, то під дією електричного поля починається дрейф електронів від поверхні вглиб кристала. При пороговій напрузі $U_{зг}=U_{зг_{пор}}$ відбувається інверсія типу електропровідності приповерхневого шару і виникає канал p - типу, що з'єднує електрично області витоку і стоку (рис. 4.12, б).

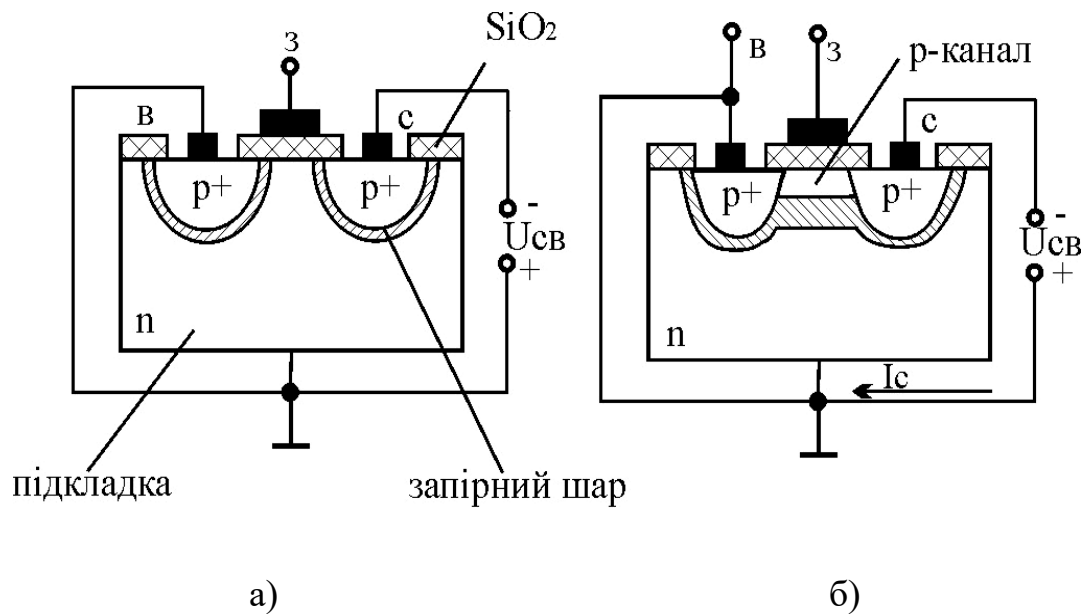


Рис 4.12 – Будова МДП - транзистора з індукованим каналом:

а) $U_{зв}=0$; б) $U_{зв} < 0$

При ненульовій напрузі стоку через канал і в зовнішньому колі потече струм I_c , який в каналі зумовлений рухом дірок від витоку до стоку. Оскільки струм I_c , що протікає через канал, створює на його опорі падіння напруги $U(x)$, то електричне поле біля витоку стає більшим, ніж біля стоку, і тому канал біля витоку ширший.

При збільшенні негативної напруги на затворі глибина проникнення інверсного шару в НП збільшується, канал розширюється, його провідність і струм стоку I_c зростають. Цей режим, коли збільшення за модулем напруги $U_{зв}$ приводить до зростання струму стоку I_c , називають режимом збагачення.

Очевидно, що при прикладенні до затвора позитивної напруги струм стоку буде складати мізерну величину, як струм $p-n$ – переходу в зворотному включенні, оскільки каналу не існуватиме.

Статична стокозатворна характеристика МДН-транзистора показана на рис. 4.13. Форма характеристики відповідає принципу дії МДН-транзистора з індукованим каналом.

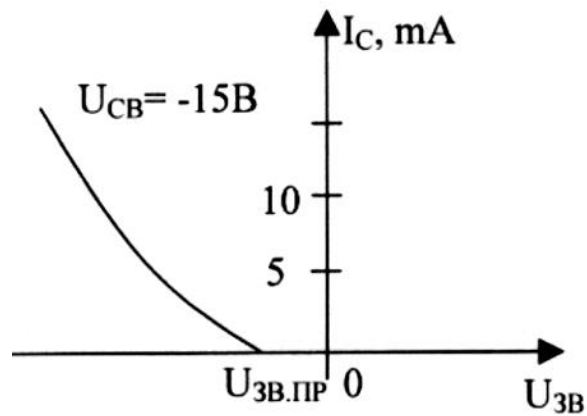


Рис. 4.13 – Стокозатворна характеристика МДН - транзистора з індукованим р – каналом

Стокові (вихідні) характеристики МДН - транзистора з індукованим каналом показані на рисунку 4.14.

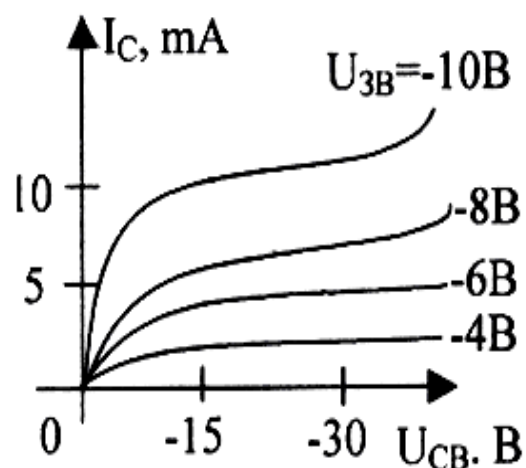


Рис. 4.14 – Вихідна характеристика МДН - транзистора збагаченого типу

Зміщення вихідних характеристик угору при збільшенні негативної напруги $U_{ЗВ} > U_{ЗВ,пер}$ зумовлене розширенням каналу і зменшенням його електричного опору (зростанням струму стоку).

У МДН-транзисторах із вбудованим каналом канал створюється конструктивно, на стадії виготовлення, а не виникає внаслідок інверсії типу електропровідності приповерхневого шару, як у транзисторах з індукованим

каналом. Тому в таких транзисторах при нульовій напрузі на затворі і при напрузі між стоком та виток, відмінній від нуля, через канал протікає деякий струм, який називається початковим струмом стоку $I_{c_{поч}}$ (рис. 4.15).

В МДН – транзисторах з вбудованим каналом р - типу збільшення негативної напруги на затворі приводить до розширення каналу і збільшення струму стоку (рис. 4.15, б). Збільшення на затворі такого транзистора позитивної напруги (рис. 4.15, в) спричиняє надходження електронів з товщі напівпровідника до приповерхневого шару. Ширина каналу, його електропровідність, а також струм стоку зменшуються.

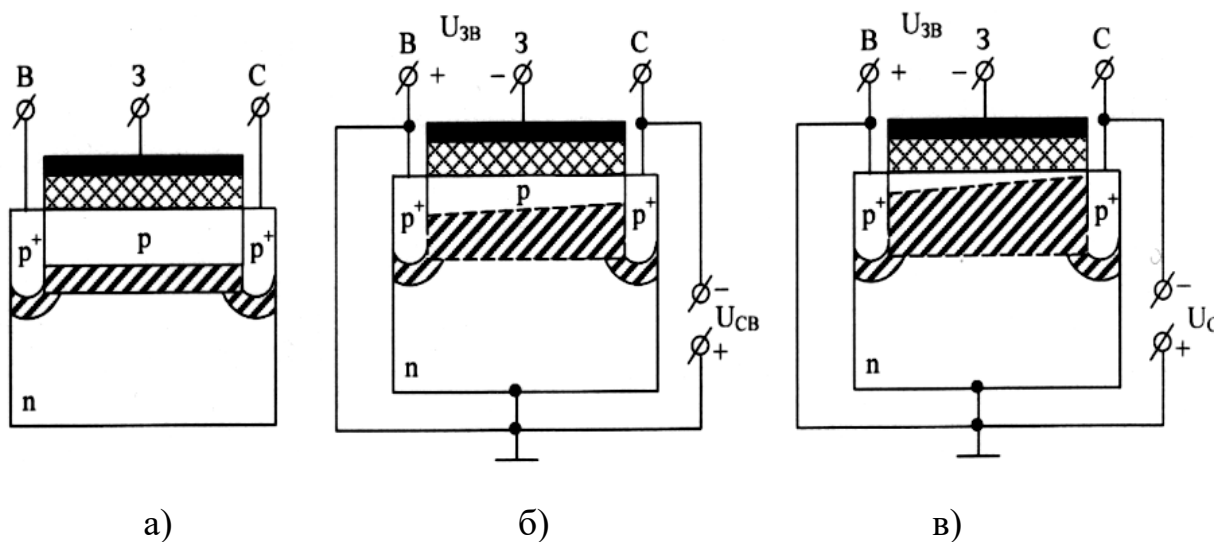


Рис. 4.15 – Будова МДН - транзистора із вбудованим каналом

При деякій позитивній напрузі на затворі ($U_{зв_{відс}}$) відбувається інверсія типу провідності каналу, і області стоку й витоку розділяються областю n - типу. Струм стоку зменшується до значення зворотного струму p - n – переходу.

Режим роботи транзистора, коли збільшення напруги $U_{зв}$ за модулем приводить до зменшення струму стоку, називають режимом збіднення. Оскільки лише МДН-транзистори з вбудованим каналом, крім режиму збагачення, мають ще й режим збіднення, то вони називаються польовими транзисторами збідненого типу.

Статичні характеристики МДН – транзистора з вбудованим каналом p -типу наведені на рисунку 4.16. Вигляд їх подібний до вигляду характеристик інших польових транзисторів. Однак ці характеристики, на відміну від попередніх, мають область позитивних затворних напруг (область збіднення) і область негативних затворних напруг (область збагачення).

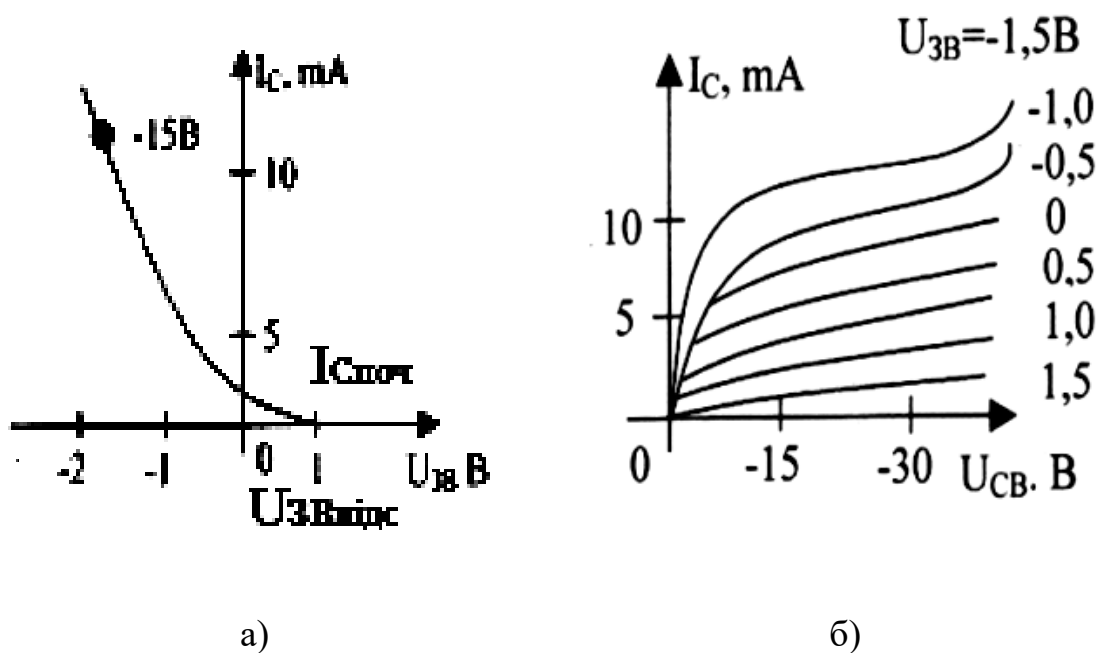


Рис. 4.16 – Статичні характеристики МДН-транзисторів з вбудованим p -каналом: а) стокозатворні; б) стокові

Переваги польових транзисторів – високий вхідний опір і, як наслідок, дуже мале споживання енергії в керуючому колі та високий порівняно з біполярним транзистором коефіцієнт підсилення потужності. Та обставина, що металевий затвор в цих приладах ізольований від напівпровідникової підкладки тонким шаром діелектрика, зумовлює, що вхідний опір МДН – транзисторів у десятки – сотні разів вищий, ніж у польовому транзисторі з керуючим p - n -переходом, і досягає десятків мегаомів, тобто затворний струм I_z не перевищує одиниць наноамперів. До того ж, ця властивість польових транзисторів з ізольованим затвором зумовлює збільшення завадостійкості і надійності роботи електронних схем, у яких вони використовуються.

Але у таких приладів є суттєвий недолік. Відомо, що шар діелектрика

завтовшки 1 мкм пробивається напругою 500 – 600 В. У МДН - транзисторах ізолювальна плівка має товщину 0.1 – 0.15 мкм, і тому її пробивна напруга не перевищує кількох десятків вольтів. Внаслідок цього МДН – транзистори є дуже чутливими до статичної електрики, навіть до тієї, що накопичується на людському тілі. Тому в довідниках рекомендовано паяння і згинання виводів цих транзисторів здійснювати не ближче 3 мм від корпусу. Під час транспортування, зберігання і монтажу виводи приладів повинні закорочуватись, а руки оператора і паяльник потрібно заземляти.

2.2. Технологічні основи виготовлення напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем

Основним матеріалом, який використовується для виготовлення напівпровідникових ІМС, є кремній. Для отримання кремнію з електронною провідністю (кремній n-типу) застосовують такі легуючі домішки: арсен, стибій або фосфор. Домішками для одержання кремнію р-типу є алюміній або бор.

Однією з важливих характеристик напівпровідникового матеріалу є його питомий опір, який визначається концентрацією електронів n і дірок p , а також їх рухливостями відповідно. Якщо донорні і акцепторні домішки в напівпровідникових матеріалах відповідно n-типу або р-типу повністю іонізовані, то можна вважати, що кількість електронів і дірок дорівнює кількості домішкових атомів, тобто $n = N_d$ і $p = N_a$.

Кремній дуже технологічний матеріал, оскільки має широкий діапазон питомого опору при легуванні різними домішками. До того ж на кремнієвій пластині в процесі термічної обробки легко одержати плівку двооксиду кремнію, яка відіграє роль захисної маски або під затворного діелектрика. Якщо врахувати також, що елементи кремнієвих ІМС можуть працювати в широкому діапазоні температур з невеликими струмами втрат і допускають

великі короткочасні перевантаження, то стає очевидною перевага використання кремнію в напівпровідникових ІМС.

Для виготовлення ІМС промисловістю випускаються кремнієві підкладки у вигляді тонких пластин круглої форми товщиною не більше 200 – 300 мкм і діаметром 40 – 60 мм. На поверхні або в об'ємі таких підкладок формуються елементи напівпровідникової ІМС. В основі формування елементів на підкладці лежить планарна технологія, яка дозволяє груповим методом обробляти одночасно кілька десятків підкладок з сотнями і тисячами напівпровідникових ІМС на кожній. Після закінчення технологічного циклу виготовлення елементів мікросхем підкладки розрізаються алмазним різцем або лазерним променем на окремі кристали, які і являють собою напівпровідникові ІМС.

В планарній технології багаторазово повторюються однотипні операції для створення різних по структурі ІМС. Це дозволяє виділити невелику кількість основних технологічних операцій і розглянути їх більш детально.

Основні технологічні операції при виготовленні ІМС, що формують інтегральний елемент, можна звести до наступних етапів: підготовка напівпровідникової підкладки; окислення; осадження металевих, напівпровідникових чи діелектричних плівок; фотолітографія; дифузія; іонне легування.

Підготовка напівпровідникової підкладки полягає в її послідовній механічній обробці. Підкладки кремнію шліфують до заданої товщини, потім полірують, піддають травленню і промивають. Епітаксціальні структури не вимагають додаткової механічної обробки, а лише піддаються травленню і промиванню перед процесами створення схем.

Окислення. На поверхні кремнію вирощується плівка двоокису кремнію SiO_2 , яка має близький до кремнію коефіцієнт теплового розширення, що дозволяє використовувати її як надійне захисне покриття, а також як ізолятор окремих компонентів ІМС, маску при проведенні локальної дифузії і активну частину приладу в МДН-структурах.

Найбільш технологічним методом отримання плівок SiO_2 являється термічне окислення поверхні кремнію. В якості окисного середовища використовують сухий або зволожений кисень або пари води. Температура робочої зони при окисненні $1100-1300^{\circ}C$. Окислення проводиться методом відкритої труби в потоці окисника. В сухому кисні вирощується найбільш досконалий по структурі окисний шар, але процес при цьому проходить повільно (при $T = 1200^{\circ}C$ товщина шару SiO_2 складає $0,1 \mu m$).

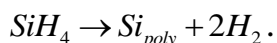
На практиці доцільно проводити окислення в три стадії: в сухому кисні, вологому кисні і знову у сухому. Для стабілізації властивостей захисних окисних шарів у процесі окислення в середовище вологого кисню або парів води додають борну кислоту, двоокис титану, п'ятиокис ванадію тощо.

Окрім термічного, використовується хімічне, анодне і плазмове окислення кремнію.

Захисні плівки SiO_2 отримують також методом іонного впровадження іонів кисню. Основною перевагою цього методу являється можливість локального нанесення плівок SiO_2 на ділянки поверхні кремнію.

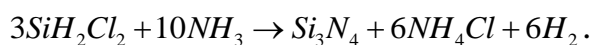
Для отримання двоокису кремнію широко застосовується піроліз кремнійорганічних з'єднань, силанів та хлоридів кремнію.

Осадження полікремнію. При осадженні полікристалічного кремнію відбувається реакція піролітичного розкладу моносилану (SiH_4) в реакторі пониженого тиску в інертному середовищі при тиску $66,7 Pa$ і в діапазоні температур $580...625^{\circ}C$ зі швидкістю осадження порядку $5 \cdot 10^{-8} cm/s$:



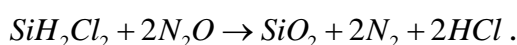
Чим вища температура у вказаному діапазоні, тим більш однорідною і дрібнозернистою виходить плівка полікремнію. Після осадження проводиться легування полікремнію домішкою за допомогою дифузії або іонної імплантації. Після легування проводиться термічна витримка плівки полікремнію в сухому азоті при температурах $900...1100^{\circ}C$ для зниження опору плівки.

Осадження нітриду кремнію. При осажденні нітриду кремнію в реакторі пониженого тиску (при температурі 800°C) відбувається термічна дисоціація SiH_2Cl_2 у присутності аміаку:



Процес відбувається при тиску порядку $34,7 \text{ Па}$.

Осадження двоокису кремнію. При осажденні SiO_2 в реакторі пониженого тиску відбувається термічна дисоціація SiH_2Cl_2 в присутності N_2O при тиску $13 \dots 66 \text{ Па}$ і температурі $900 \dots 950^{\circ}\text{C}$:



Якщо необхідно отримати оксид, легований фосфором (фосфоросилікатне скло – ФСС), осадження проводять у присутності POCl_3 . Осажене ФСС стабілізує поверхню та об'єм оксиду, що знаходиться під ним за рахунок того, що воно зв'язує іони натрію в оксиді і заряджені частинки і іони різних речовин на зовнішній поверхні кристала.

Фотолітографія. Цей процес призначений для створення на поверхні підкладки захисної маски малих розмірів практично будь-якої складності, що використовується надалі для проведення локальних процесів травлення, дифузії, епітаксії і ін. Утворюється вона за допомогою фоточутливого шару (фоторезисту), який під дією світла змінює свою структуру. За здатністю змінювати свої властивості при опроміненні фоторезисти бувають негативні та позитивні.

Освітлення негативного фоторезисту викликає додаткову полімеризацію його молекул, внаслідок чого після проявлення пластини напівпровідника на ній залишаються нерозчинні ділянки рисунка, які представляють собою негативне зображення фотошаблону, а неосвітлені ділянки фоторезисту змиваються у розчині проявника.

В позитивному фоторезисті під дією світла відбувається руйнування молекул. При проявленні такий фоторезист видаляється з освітлених ділянок, а на поверхні пластини створюється позитивне зображення фотошаблону.

Фоторезист повинен бути чутливим до опромінення, мати високі роздільну здатність та кислотостійкість.

Для створення певного рисунка за допомогою фоторезисту використовується фотошаблон, що представляє собою плоскопаралельну пластину з оптичного скла, на поверхні якої міститься рисунок, за розмірами відповідний до майбутньої мікросхеми. Фотошаблон містить до 2000 зображень однієї мікросхеми.

Послідовність фотолітографічного процесу полягає в наступному.

На окислену поверхню кремнію з товщиною оксиду 0,3...0,6 мкм за допомогою центрифуги наносять шар фоторезисту, який сушать спочатку при кімнатній температурі, потім при температурі 100...150°C.

Підкладку суміщають з фотошаблоном і опромінюють ультрафіолетовим світлом. Засвічений фоторезист проявляють, а потім промивають у деіонізованій воді. Фоторезист, що залишився, задублюють при кімнатній температурі і температурі 200°C протягом однієї години, після чого окислена поверхня кремнію відкривається у місцях, що відповідають рисунку фотошаблону. Відкриті ділянки оксиду травлять у спеціальних буферних травниках (наприклад, 10 мл HF і 100 мл розчину NH_4F у воді).

На ділянки оксиду, покриті фоторезистом, травник не діє. Після травлення фоторезист розчиняють органічним розчином і гарячою сірчаною кислотою. Поверхню пластини ретельно промивають. На поверхні кремнію залишається шар SiO_2 , що відповідає рисунку схеми.

Плазмохімічні процеси. Широку промислову реалізацію отримали наступні плазмохімічні процеси (ПХП):

- локальне розмірне травлення різних одно- і багат шарових структур;
- видалення фоторезисту;
- осадження діелектричних шарів двоокису і нітриду кремнію.

При високочастотному або НВЧ-розряді в газовому середовищі утворюється плазма. При непружних зіткненнях електронів з молекулами газу збуджуються обертові і коливальні ступені свободи молекул. При

останньому типі зіткнень утворюються іони, вільні радикали і метастабільні частинки, які беруть участь в послідовних хімічних реакціях. Основну роль в утворенні хімічно активних частинок у плазмі відіграють процеси дисоціації молекул електронним ударом. Швидкість таких процесів залежить від функції розподілу електронів за енергіями і від зіткнення електронів, а останні залежать від напруженості електричного поля в реакторі, тиску газу і частоти електромагнітного поля, що збуджує плазму, а також від конструкції реактора, розміщення пластин в ньому та їх підігріву.

Плазмохімічне травлення тонких плівок. У виробництві інтегральних схем найбільш важливу роль із процесів плазмохімії відіграє травлення полікремнію, нітриду кремнію, SiO_2 і алюмінію.

В якості газових сумішей частіш за все використовується суміш із киснем CCl_4 , SF_6 , $CF_4 + H_2$, $C_2F_6 + C_2H_2$ тощо.

При травленні кремнію продуктами первинної дисоціації молекул CF_4 в плазмі являються: CF_3 , CF_3^+ , F , CF_3^- , F^- . Аніони CF_3^- і F^- звичайно не приймають участь у процесі травлення, так як пластини знаходяться під від'ємним потенціалом по відношенню до плазми, а радикал CF_3 і іон CF_3^+ швидко взаємодіють з кремнієм.

Додавання кисню в плазму CF_4 приводить до значного збільшення швидкості травлення кремнію, а також до видалення кисню із зони реакції.

Для селективного травлення двоокису кремнію (SiO_2) на кремнії в плазму CF_4 додається водень.

На відміну від рідинного травлення плазмохімічне травлення може бути анізотропним, що досягається введенням молекулярного хлору в склад газової домішки.

Дифузія. Локальна дифузія являється одною із основних технологічних операцій при створенні напівпровідникових ІМС. Процес дифузії визначає профіль інтегральної структури і основні параметри компонентів ІМС.

Дифузія в напівпровідникових кристалах представляє собою направлене переміщення домішкових атомів у сторону зменшення їх концентрації. Дифузія – один з основних технологічних процесів виготовлення напівпровідникових приладів. Саме за допомогою дифузії найчастіше формуються р-n-переходи та інші активні області напівпровідникових структур.

З мікроскопічної точки зору процес дифузії полягає в випадкових переміщеннях атомів у об'ємі твердого тіла. Переміщення відбувається у формі послідовних стрибків із одного потенційного мінімуму до іншого, що розділені потенційним бар'єром, який називається енергією активації процесу дифузії.

Розрізняють кілька механізмів дифузії:

1. Обмінний механізм, який реалізується при взаємному обміні місцями двох сусідніх атомів.
2. Кільцевий механізм, який реалізується при узгодженому обміні місцями групи атомів, розміщених по кільцю.
3. Вакансійний механізм, який реалізується за рахунок переміщення атомів по вакансіях.
4. Міжвузольний механізм, який реалізується за рахунок переміщення атомів по міжвузлях.
5. Комбінований механізм, коли одночасно реалізується і вакансійний і міжвузольний механізми.

Механізми 1 та 2 характерні для процесів самодифузії. Механізм 3 характерний як для самодифузії, так і для дифузії домішкових атомів заміщення. Механізм 4 має місце, в основному, при дифузії атомів домішки заміщення.

В ідеальних бездефектних монокристалах можливі лише 1 та 2 механізми дифузії. В кожному з цих випадків енергія активації дифузії дуже велика і значно перевищує значення отримані експериментально. Це

зумовлено тим, що реальні кристали містять дефекти структури, які значно полегшують процес дифузії.

Крім вищеназваних механізмів дифузії, істотну роль в дефектних матеріалах може відігравати дифузія вздовж дислокацій та по межах зерен, а також поверхнева міграція адсорбованих атомів та молекул.

У відповідності до кінетичної теорії кристалів, при кожній заданій температурі деяка частина атомів, що знаходяться у вузлах кристалічної решітки, має енергію, що перевищує енергію зв'язку атома з вузлом кристалічної решітки. Такі атоми можуть залишити вузол і перейти до міжвузольного простору. При цьому створюється дефект ґратки, який складається із вакансії та атома у міжвузлі. Дефекти такого роду називаються дефектами по Френкелю, а їх концентрацію можна визначити з виразу:

$$n_F = \sqrt{C_A C_M} \exp(-E_{aF}/kT), \quad (1.12)$$

де C_A – концентрація атомів, C_M – концентрація міжвузлин, E_{aF} – енергія активації дефекта по Френкелю, T – абсолютна температура, k – стала Больцмана.

Крім дефектів по Френкелю в реальному монокристалі можуть існувати ізольовані вакансії – дефекти по Шотткі. Їх концентрація визначається виразом:

$$n_S = C_A \exp(-E_{aS}/kT), \quad (1.13)$$

де E_{aS} – енергія активації дефекта по Шотткі.

Оцінімо коефіцієнт дифузії атомів у твердих тілах, скориставшись аналогією з дифузійним рухом молекул в газах. В обох випадках змішування речовин відбувається за рахунок теплового руху, однак в твердих тілах в результаті великих сил взаємодії між частинками ці процеси проходять значно повільніше, ніж в газах. Швидкість перемішування речовин в

твердому стані визначається частотою переходу частинки за одиницю часу із одного рівноважного стану до іншого:

$$w = w_0 \exp(-E_{ad}/kT),$$

де E_{ad} – висота потенціального бар'єру (енергія активації дифузії), w_0 постійна величина, характерна для заданої системи. Замість величини w Френкель ввів обернену величину $\tau = 1/w$, яка характеризує середній час перебування атома у мінімумі потенціального рельєфу решітки. Тоді для τ можна записати:

$$\tau = \tau_0 \exp(E_{ad}/kT), \quad (1.14)$$

де τ_0 – величина близька до періоду коливань атома навколо положення рівноваги. Ця мало змінюється для різних кристалів, тому можна приблизно вважати $\tau_0 \approx 10^{-13}$.

Таким чином, кожен атом в середньому за час τ перестрибує в сусідній потенціальний мінімум, переміщаючись на сталу решітки a . Це дозволяє ввести до розгляду середню швидкість переміщення атомів у кристалі $v = a/\tau$. Тоді по аналогії з газами для коефіцієнта дифузії в твердому тілі можна записати:

$$D = \eta v^2 \tau = \eta \frac{a^2}{\tau} \equiv D_0 \exp\left(-\frac{E_{ad}}{kT}\right), \quad (1.15)$$

де $D_0 = \eta \frac{a^2}{\tau_0}$. Коефіцієнт пропорційності η приймає різні значення для різних типів кристалічної решітки ($\eta = 1/6, 1/12, 1/24$ для простої, гране-центрованої та об'ємно-центрованої кубічної ґратки відповідно).

Таким чином із (1.15) видно, що дифузія має термоактиваційну природу і підпорядковується закону Арреніуса.

Локальну дифузію проводять у відкриті ділянки кремнію за методом відкритої труби в потоці газу-носія. Температурний інтервал дифузії для кремнію становить $950...1300^{\circ}\text{C}$. Кремнієві пластини розміщують у високотемпературній зоні дифузійної печі. Газ-носії в кварцовій трубі при своєму русі витісняє повітря. Джерела домішки, розміщені в низькотемпературній зоні, при випаровуванні потрапляють в газ-носії і в його складі проходять над поверхнею кремнію.

Джерела домішок, що використовуються у виробництві ІМС, можуть бути твердими, рідкими і газоподібними. В якості рідких джерел використовуються хлороксид фосфору POCl_3 і BBr_3 . Після встановлення температурного режиму в робочу зону печі поступає кисень, що сприяє утворенню на поверхні кремнію фосфор – і борсилікатного скла. В подальшому дифузія проходить із шару рідкого скла. Одночасно шар скла захищає поверхню кремнію від випаровування і попадання сторонніх частин.

Таким чином, в локальних ділянках кремнію відбувається дифузія легуючої домішки і створюються області напівпровідника з визначеним типом провідності.

Процес іонного легування. Переваги цього методу в основному пов'язані з нетепловим характером легування. До них відносяться:

- універсальність, тобто можливість введення будь-якої домішки у будь-яку тверду речовину;
- низькотемпературність, так як звичайно супутня іонному легуванню термічна витримка проводиться при суттєво більш низьких температурах, ніж термічна дифузія, що приводить до меншої деформації профілю легування і меншої деградації границі розділу $\text{Si}-\text{SiO}_2$;
- можливість гнучкого керування розподілом домішки в усіх трьох вимірах варіацією енергії іонів, застосуванням захисних масок і скануванням пучка;

- можливість чіткого дозування домішки при легуванні за допомогою точного контролю іонного струму та часу опромінення;
- чистота домішки, що забезпечується за рахунок електромагнітної сепарації іонних пучків і вакуумних умов процесу;
- можливість легування через діелектричні і металеві плівки.

Первинним процесом при іонному легуванні являється проникнення прискорених на іонному прискорювачі іонів у речовину і їх гальмування до теплових швидкостей. В першому наближенні профіль впроваджених іонів можна вважати таким, що підлягає розподілу Гауса, параметрами якого являються середньостатистична довжина проекції пробігу R_n на перпендикуляр до поверхні пластини і середньоквадратичний розкид проєційованих пробігів.

Основними домішками, що використовуються в процесах іонного легування МДН-структур, являються бор, фосфор, миш'як.

При опроміненні кремнію іонами утворюються радіаційні дефекти (вакансії, атоми у міжвузлях, дислокації і дефекти упаковки) і навіть повна аморфізація напівпровідника, тобто повне розвпорядкування структури.

Для відновлення кристалічної структури кремнію і зменшення частки радіаційних дефектів застосовується процес післяімплантаційного термічного відпалу при температурах 600...800°C (максимум 900°C).

Для керування положенням піку розподілу впровадженої домішки, в основному наближенням його до поверхні напівпровідника, застосовується легування через тонкі плівки оксиду або іноді нітриду кремнію (це робиться при підлегуванні каналу МДН-транзистора для зміни його порогової напруги).

Концентрація впроваджених іонів визначається дозою легування, а глибина впровадженої домішки – енергією іонів. В МДН-технології дози коливаються від сотих часток до сотень мікрокулонів, а енергія в межах 20 ... 350 кеВ.

Металеві контактні плівки для ІМС зазвичай виготовляють вакуумними методами осадження: термічне та електронно-променеве випаровування, високочастотне магнетронне розпилення та електрохімічне осадження.

Метод вакуумного випаровування полягає в наступному. Усі речовини в залежності від температури нагрівання можуть знаходитися в одному з трьох агрегатних станів: твердому, рідкому та у вигляді газу. І саме перехід з твердого стану у газ використовують у цьому методі. Молекулярний потік речовини, яку випаровують, направлений на підкладку. Для того, щоб забезпечити направлений потік, треба досить глибокий вакуум. Молекули, потрапивши на підкладку, утворюють плівку.

Розрізняють два різновиди даного методу: з резистивним нагрівачем і з електронно-променевим нагрівачем. Принцип роботи електронно-променевого нагрівача полягає у тому, що кінетична енергія потоку прискорених електронів при бомбардуванні ними поверхні речовини перетворюється в теплову енергію, в результаті чого матеріал нагрівається до температури випаровування.

Для створення електронного променя необхідно мати джерело вільних електронів. Для того щоб електрон вилетів з металу назовні, його швидкість має бути направлена в сторону поверхні металу і він повинен подолати дію сил, які намагаються його повернути назад у метал.

Роботу по подоланню електроном поверхневих сил, які намагаються утримати його в металі, називають роботою виходу. При кімнатній температурі кількість електронів у металі, енергія яких перевищує роботу виходу, дуже мала. Однак їх кількість різко збільшується з ростом температури за рахунок збільшення інтенсивності теплового хаотичного руху.

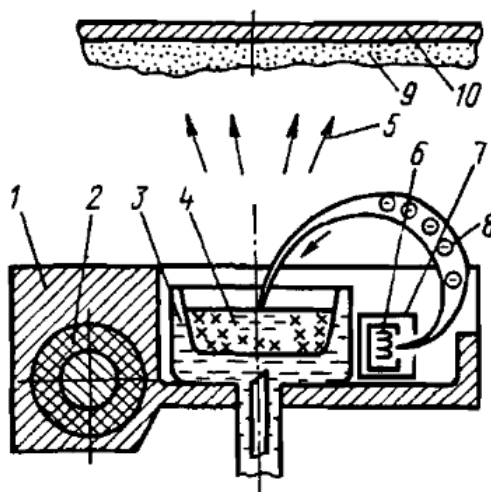
Випромінювання електронів металами, які нагріті до високої температури, називають термоелектронною емісією, а елементи з металу, які використовуються для отримання вільних електронів – термоелектронними катодами, або просто катодами. Матеріалом катода зазвичай виступає

вольфрам. При подачі струму розжарення від джерела відбувається нагрів термокатада з випусканням електронів. Ці електрони володіють різною енергією і напрямом руху. Для прискорення (підвищення енергії) і спрямованого руху електронів необхідно створити прискорююче електричне поле.

Фокусування електронного променя дозволяє отримувати велику концентрацію потужності порівняно малої поверхні (5×10^8 Вт/см²), а отже, випаровувати будь-які, навіть дуже тугоплавкі матеріали з досить великою швидкістю.

Розглянемо конструкцію електронно-променевого випаровувача (рис.1.3). Він складається з трьох основних частин: електронної гармати, відхиляючої системи і водоохолоджуваного тигля.

Електронна гармата призначена для формування потоку електронів і складається з вольфрамового термокатада і фокусуючої системи. Електрони, які емітуються катодом, проходять фокусуючу систему, прискорюючись за рахунок різниці потенціалів між катодом і анодом (до 10 кВ) і формуються в електронний промінь.



1 – полюсний наконечник, 2 – електромагніт, 3 – водоохолоджуваний тигель, 4 – матеріал для випаровування, 5 – потік речовини, 6 – термокатод, 7 – фокусуюча система, 8 – електронний промінь, 9 – тонка плівка, 10 – підкладка.

Рис. 1.3. Електронно-променевий випаровувач

Відхиляюча система призначена для створення магнітного поля, перпендикулярного напрямку швидкості руху електронів, що виходять з

фокусуючої системи гармати, і складається з полюсних наконечників і електромагніту. Між полюсними наконечниками розташовані водоохолоджувані тигель та електронна гармата. Відхиляючи електронний промінь магнітним полем, його направляють в центральну частину водоохолоджуваного тигля. У місці падіння променя створюється локальна зона випаровування речовини з рідкої фази. Нагрітий електронним бомбардуванням матеріал випаровується, і потік парів осідає у вигляді тонкої плівки на підкладці. Змінюючи струм в котушці електромагніту, можна сканувати променем вздовж тигля, що запобігає створення "кратера" в матеріалі, який ми випаровуємо.

Мідні водоохолоджувані тиглі ємністю 50 см³ і більше забезпечують тривалу безперервну роботу без додавання матеріалу випаровування, який, крім того, не контактує в розплавленому вигляді з мідними стінками тигля, а значить, і виключається їх взаємодія.

Недоліки цих випаровувачів – це складність апаратури живлення і управління, труднощі випаровування металів високої теплопровідності (мідь, алюміній, срібло, золото) з водоохолоджуваного тигля, необхідність частої заміни і юстирування катода, а також живлення високою напругою, що вимагає дотримання відповідних правил техніки безпеки.

Магнетронне розпилення у своїй основі використовує поведінку заряджених частинок у направлених під кутом один до одного електричного і магнітного полях.

Електрони залишають катод, прискорюються в перпендикулярному до нього напрямі електричного поля і, пройшовши позитивний стовп, потрапляють на анод і захоплюються ним. Якщо перпендикулярно електричному полю накласти паралельно катоду і дуже близько до нього магнітне поле, траєкторії електронів будуть являти собою циклоїди. Емітовані катодом електрони під дією іонного бомбардування, не можуть при цьому рухатися до анода в перпендикулярному напрямку, так як виявляються у своєрідній пастці, створюваної магнітним полем.

До того часу, поки не відбудеться кілька іонізуючих зіткнень електронів з атомами робочого газу, вони переміщуються в пастці, втрачають енергію, отриману від електричного поля. Велика частина енергії електронів витрачається на іонізацію у безпосередній близькості від катода, де створюється висока концентрація позитивних іонів. У результаті зростає інтенсивність бомбардування катода і швидкість його розпилення. Швидкість нанесення тонких плівок в магнетронних системах складає 100 – 200 мкм/с.

Так як застосування магнітного поля збільшує ефективність іонізації, тліючий розряд в магнетронних системах підтримується при низьких тисках. Магнетронні системи вельми ефективно працюють при тисках аж до 10^{-2} Па і постійній напрузі, що забезпечує високу чистоту плівок.

Метод магнетронного розпилення дозволяє значно підвищити параметри і розширити технологічні можливості у порівнянні з подібними системами:

- збільшити більш ніж на порядок швидкість нанесення плівок, наблизивши її до швидкості термовакuumного осадження, і зменшити на порядок робочий тиск, а значить, і вірогідність попадання газових домішок в плівку;
- виключити інтенсивне бомбардування підкладок високоенергетичними електронами, тобто знизити неконтрольований нагрів підкладок і пошкодження напівпровідникових структур;
- забезпечити нанесення плівок алюмінію і його сплавів з великими швидкостями розпилення;
- замінити високовольтне обладнання низьковольтним.

Крім того, магнетрони забезпечують тривалий ресурс роботи і відкривають можливість створення промислових установок напівнеперервної і безперервної дії. В даний час магнетрони є одним з основних приладів нанесення тонких плівок при виробництві всіх типів ІМС.

Електрохімічне осадження плівок як метод відоме вже давно. Апаратура для проведення процесу в основному досить проста і складається

з анода і катода, занурених у відповідний електроліт. Метал осідає на катоді, і співвідношення між вагою матеріалу осадження і параметрами процесу можна виразити за допомогою першого і другого законів електролізу, з яких випливає, що:

- Вага осадженого матеріалу пропорційна кількості струму, що пройшов через розчин.
- Вага матеріалу, осадженого при проходженні через розчин однакової кількості струму, пропорційна електрохімічному еквіваленту E .

Цей метод одержання плівок відрізняється від попередніх тим, що робочим середовищем є рідина. Однак характер процесів схожий з іонно-плазмовим напиленням, оскільки і плазма, і електроліт являють собою квазінейтральну суміш іонів і неіонізованих молекул або атомів. А головне, осадження відбувається також поступово (пошарово) як і напилення, тобто забезпечує отримання тонких плівок гарної якості.

В основі електрохімічного осадження лежить електроліз розчину, що містить іони необхідних домішок. Наприклад, якщо потрібно осадити мідь, використовується розчин мідного купоросу, а якщо золото або нікель – розчини відповідних солей.

Іони металів дають в розчині позитивний заряд. Тому, щоб осадити металеву плівку, підкладку слід використовувати як катод. Якщо підкладка є діелектриком або має низьку провідність, на неї попередньо наносять тонкий металевий підшар, який і служить катодом. Підшар можна нанести методом термічного або іонно-плазмового розпилення.

Велика перевага електрохімічного осадження перед розпиленням полягає в набагато більшій швидкості процесу, яка легко регулюється зміною струму. Тому основна область застосування електролізу в мікроелектроніці – це отримання порівняно товстих плівок (10 – 20 мкм і більше). Якість (структура) таких плівок гірша, ніж при конденсації, але для ряду застосувань вони виявляються цілком прийнятними.

Осадження плівки на поверхню з довільного матеріалу за рахунок хімічних реакцій, що відбуваються в газовій фазі в приповерхневій області, відоме як осадження з парової фази або пароосадження. При хімічному осадженні з газової фази (ХОГФ або CVD – chemical vapor deposition) склад газової фази і склад осаду істотно розрізняються. Летюче з'єднання осажденного елемента подається до підкладки, де піддається термічному розкладанню (піролізу) або вступає в відновлювальні хімічні реакції з іншими газами (або парами); при цьому нелетучі продукти реакцій осідають на поверхню підкладки. Осади утворюються в результаті великої кількості хімічних реакцій, що протікають у газовій фазі поблизу поверхні підкладки і на самій поверхні підкладки, що значною мірою ускладнює процес осадження, але робить його набагато більш універсальним і гнучким.

В останні роки технологія трафаретного друку стала застосовуватися для нанесення паст не тільки на керамічні, але й на інші типи підкладок (полімерні, сталеві емальовані, скляні) з використанням металевих, полімерних, полімерно-металевих та інших сіток. Трафарет являє собою дротяну сітку з нержавіючої сталі або капронової нитки з нанесеним на неї фотоспособом захисним малюнком. Сітка вмонтована в металеву рамку. Керамічна підкладка встановлюється під трафаретом з зазором, що забезпечує деформацію сітки в межах її пружності.

Процес трафаретного друку полягає в дозуванні пасти на підкладку шляхом продавлювання її через трафарет за допомогою спеціального ракеля. Рухомий за трафаретом ракель просуває собою пасту, яка під тиском ракеля заповнює отвори трафарету. Тиск ракеля залежить від швидкості його руху, кута зустрічі з поверхнею, від щільності прилягання ракеля до трафарету і від зазору між трафаретом і підкладкою.

Подача пасти відбувається при прямому і зворотному русі ракеля. Кут нахилу леза ракеля впливає на тиск ракеля і, отже, на товщину плівки.

Чим менше кут нахилу, тим більше тиск. Залежно від застосовуваної в'язкості паст і загальної площі комірок сітки в трафареті кут атаки

вибирається $45 \dots 60^\circ$. Для нанесення паст в основному застосовують сітчасті і біметалічні фольгові трафарети.

Необхідно, щоб пристрій нанесення паст задовольняв певним вимогам. Ракель повинен просуватися з пастою за трафаретом з незмінною швидкістю і чинити постійний тиск при постійному куті атаки. Швидкість ракеля повинна бути обернено пропорційна створюваному тиску.

Після друку слід провести сушку отриманого відбитка, для того, щоб прибрати дефекти.

3. ПРОЕКТУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ

Проектування інтегральних схем (ІС) складається з наступних етапів:

1. Вибір принципової електричної схеми інтегральних логічних елементів.
2. Розрахунок електричних характеристик інтегральних логічних елементів.
3. Розробка технології виготовлення інтегральної мікросхеми.
4. Розрахунок параметрів технологічних процесів для виготовлення інтегральної мікросхеми.

Нижче наведено методичні вказівки по виконанню кожного із наведених вище етапів проектування інтегральних схем.

3.1. Вибір принципової електричної схеми інтегральних логічних елементів

МДН технологія дозволяє створювати три базові структури, що відповідають трьом сімействам цифрових мікросхем – з каналом р-типу (логіка р-МДН), з каналом n-типу (логіка n-МДН) та комплементарного типу (КМДН). Логічні ІМС на основі транзисторів з каналом р-типу провідності потребують від’ємної напруги живлення (схеми негативної логіки), а логічні ІМС на основі транзисторів з каналом n-типу провідності – додатної напруги живлення (схеми позитивної логіки). При побудові логічних ІМС на основі комплементарних МДН транзисторів є можливим створення мікросхем як негативної, так і позитивної логіки (“полярність” логіки в даному випадку визначається послідовністю включення МДН транзисторів з каналами р- та n-типу провідності). Базовим елементом логічних МДН мікросхем є інвертор.

МДН-інвертор представляє собою пару МДН транзисторів, з’єднаних послідовно, один з яких відіграє роль активного (керуючого) транзистора, а інший – пасивного (навантажувального) транзистора (рис.1). Під дією вхідного сигналу змінюється провідність активного елементу, в результаті

чого змінюється падіння напруги на навантажувальному транзисторі та виході інвертора.

В якості активного елемента інвертора можуть використовуватись МДН-транзистори з індукованим чи вбудованим каналом n- чи p-типу провідності (рис.2). В якості навантажувального елемента інвертора можуть використовуватись лінійний резистор або МДН транзистори з індукованим чи вбудованим каналом n- чи p-типу провідності як нелінійні резистори. Різноманітність видів МДН транзисторів, а також способів їх поєднання дозволяє побудувати велику кількість базових схем МДН інверторів, які відрізняються електричними характеристиками, що являються основою інтегральних логічних елементів. На рис.2 наведена структурна схема, яка дозволяє охопити всі можливі варіанти побудови базових схем інверторів.

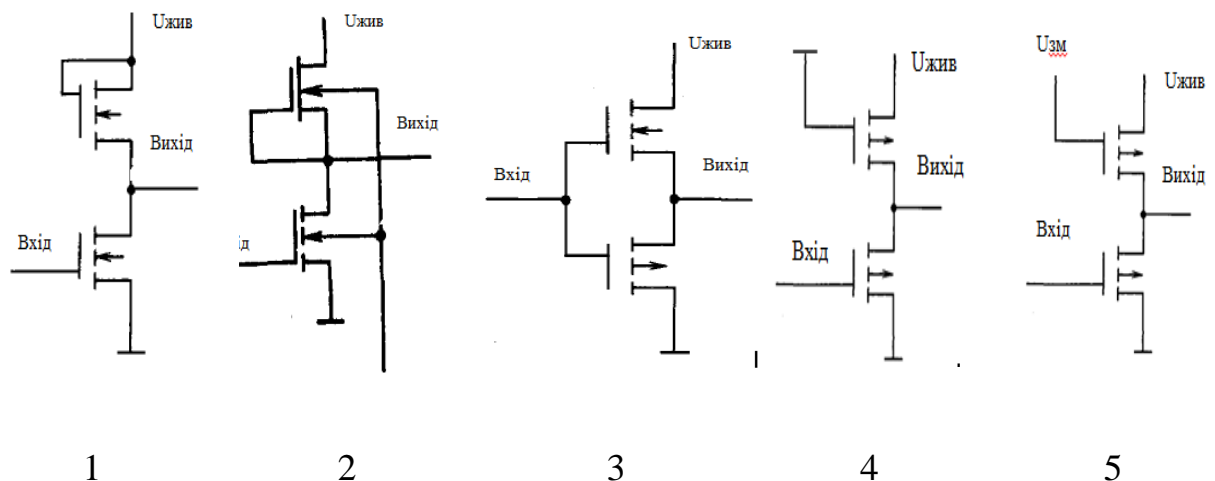


Рис.1. Способи включення МДН транзистора в якості навантажувального транзистора в МДН інверторі: його затвор може підключатись до витoku (1), стоку (2), затвору активного елемента (3), спільної шини (4) та окремого джерела живлення (5)

Використання нелінійних резисторів (МДН транзисторів) дозволяє відмовитись від застосування високоомних дифузійних чи плівкових резисторів в інтегральних схемах, що дає можливість підвищити щільність

компонування елементів і створювати всі елементи в єдиному технологічному циклі.

Вид вольт-амперної характеристики навантажувального транзистора залежить від виду МДН транзистора, способу під'єднання його затвору та полярності напруги живлення схеми інвертора. При використанні МДН транзистора в якості навантажувального елемента його затвор може підключатись до витоку (1), стоку (2), затвору активного елемента (3), спільної шини (4) та окремого джерела живлення (5). Різні способи під'єднання затвору навантажувального транзистора в схемі МДН інвертора наведені на рис.1. Найбільш поширеними є схеми 1, 2 та 3, однак навіть для них деякі комбінації активного та пасивного транзисторів для побудови МДН-інверторів не використовуються через погіршені електричні характеристики (у табл. 4 такі варіанти відмічені ризикою).

Вид ВАХ нелінійного резистора, ввімкненого між шиною живлення та стоком активного транзистора, змінюється в залежності від способу під'єднання затвору навантажувального транзистора.

Причому різні види МДН транзисторів можуть демонструвати однакові види ВАХ нелінійних резисторів. Тому доцільно класифікувати схеми МДН інверторів на групи відповідно до виду їх ВАХ. Можливі види ВАХ навантажувальних елементів наведені на рис. 3.

I група – вольт-амперна характеристика навантажувального нелінійного резистора представляє собою параболу, вершина якої лежить на осі абсцис. Схеми з резисторами, що мають такий вид ВАХ, називають схемами з нелінійними резисторами. Навантажувальний транзистор працює тільки в пологій області ВАХ.

II група – вольт-амперна характеристика навантажувального нелінійного резистора представляє собою параболу, вершина якої лежить нижче осі абсцис. Схеми з резисторами, що мають такий вид ВАХ, називають схемами з квазілінійними резисторами. Навантажувальний транзистор працює тільки в крутій області ВАХ.

III група – вольт-амперна характеристика навантажувального нелінійного резистора співпадає по виду з вольт-амперною характеристикою МДН транзистора при фіксованій величині напруги на затворі. Схеми з резисторами, що мають такий вид ВАХ, називають схемами з струмостабілізуючими резисторами (динамічне навантаження).

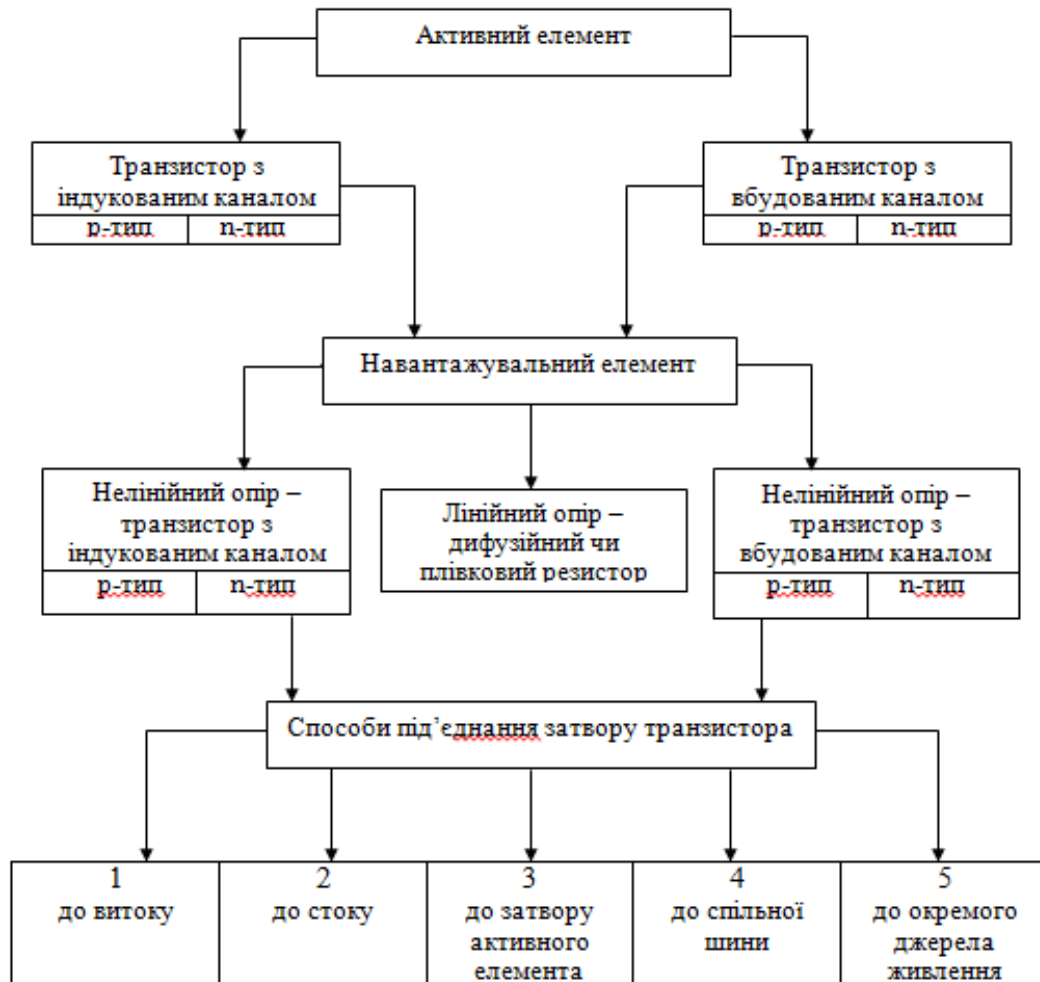


Рис. 2. Структурна схема побудови МДН інвертора

IV група – вольт-амперна характеристика навантажувального нелінійного резистора змінюється в процесі перемикування схеми і можуть бути вказані дві характеристики, що відповідають максимальній та мінімальній напрузі на затворі активного та пасивного елементів. Схеми з резисторами, що мають такий вид ВАХ, називають схемами на

комплементарних транзисторах або малопотужними схемами через низьку потужність, яку вони споживають від джерела живлення.

V група – вольт-амперна характеристика навантажувального резистора є лінійною. В якості резистора можуть бути використані опори дифузійних областей та опори резистивних плівок.

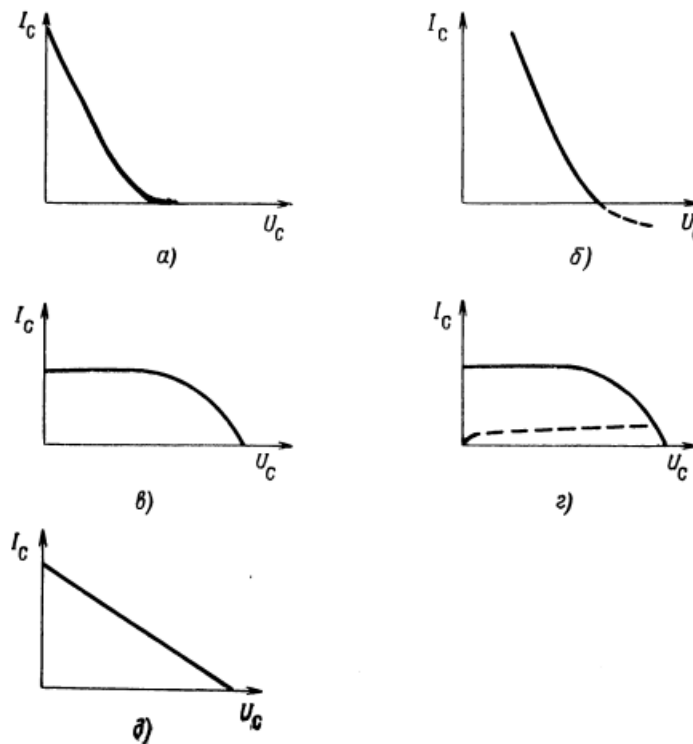


Рис.3. ВАХ навантажувальних елементів:

а) I група, б) II група, в) III група, г) IV група, д) V група

Під час класифікації навантажувальних характеристик передбачалось, що напруга живлення завжди додатна, незалежно від виду ВАХ активних елементів інверторів. Таке припущення дозволяє обмежитись розглядом лише першого квадранту вольт-амперної характеристики активного елементу.

В табл.4 наведені групи характеристик навантажувальних резисторів, що реалізуються в схемах МДН інверторів при різноманітних комбінаціях активних та пасивних елементів. Видно, що в більшості схем реалізуються I

та III групи навантажувальних кривих. Цифрами 1, 2 та 3 у табл.4 позначені три найбільш вживані способи під'єднання затворів навантажувальних транзисторів в МДН інверторів, які наведені на рис.1.

Під час розробки базової схеми МДН інвертора для подальшого проектування на його основі інтегральних схем слід дотримуватись наступних правил. Елементи інтегральних схем мають характеризуватись технологічністю, схемотехнічною універсальністю та гнучкістю, а також відповідати заданим електричним параметрам, основними з яких є швидкодія та потужність, що споживається від джерела живлення.

Таблиця 4. Види МДН інверторів по виду ВАХ при різноманітних комбінаціях активних та пасивних елементів

| Тип активного елемента | Тип навантажувального елемента | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|---|---|-------------------|---|---|--|---|----|-------------------|---|----|
| | Тип провідності каналу навантаження співпадає з типом провідності каналу активного елемента | | | | | | Тип провідності каналу навантаження протилежний типу провідності каналу активного елемента | | | | | |
| | Вбудований канал | | | Індукований канал | | | Вбудований канал | | | Індукований канал | | |
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| МДН-транзистор з вбудованим каналом | III | I | — | — | I | — | III | I | — | — | I | — |
| МДН-транзистор з індукованим каналом | III | I | — | — | I | — | III | I | IV | — | I | IV |

Технологічність є одним із основних критеріїв при виборі елементів для реалізації тієї чи іншої інтегральної схеми. Під технологічністю розуміють простоту виготовлення пасивних та активних елементів із заданими електричними параметрами і з'єднань між ними в межах єдиного технологічного циклу. Інтегральні схеми вважаються технологічними, якщо в них використано мінімальна кількість різнотипних елементів і всі елементи технологічно сумісні. Найбільшою технологічністю характеризуються схеми на МДН інверторах, в яких активний та пасивний елементи виготовлені з транзисторів одного виду та типу. Найбільшого поширення набули схеми на основі МДН транзисторів з індукованими каналами р-типу (активний та пасивний транзистор). Як видно з табл.4, в залежності від способу під'єднання затвору навантажувального транзистора може бути реалізована схема з нелінійним резистором. В схемах на транзисторах одного виду та типу завжди необхідно навантажувальні елементи виготовляти з меншими масштабними струмами порівняно з активними транзисторами. Це призводить до відмінності у геометричних розмірах активних та пасивних транзисторів.

Наступними схемами у порядку зростання технологічної складності є схеми, в яких в якості активного елемента використовується транзистор з індукованим каналом, а в якості резистора – транзистор з вбудованим каналом, тип провідності якого співпадає з типом провідності каналу активного транзистора. Така схема в залежності від способу під'єднання затвору пасивного транзистора дозволяє отримати схеми з нелінійним та струмостабілізуючим резисторами, тобто ВАХ навантажувального елемента можуть належати до I та III груп відповідно. Використовуючи в якості навантажувальних елементів транзистори з вбудованим каналом, можна їх геометричні розміри робити такими ж, як і для активних транзисторів, що дозволяє зменшити площу, яку займає схема на напівпровідниковій пластині.

Технологічно більш складними є схеми на основі транзисторів з каналами взаємодоповнюючих (комплементарних) типів провідності. Як

правило, використовуються схеми на основі МДН транзисторів з індукованими каналами, однак при цьому геометричні розміри як активних, так і пасивних транзисторів можуть бути однаковими. ВАХ навантажувального елемента належить до IV групи. Такі схеми характеризуються найбільшою швидкодією та споживають потужність лише під час перемикання.

Швидкодія цифрової схеми визначається тривалістю найбільшого фронту, який формується при закриванні ключа. Тривалість найбільшого фронту тим менша, чим більший струм, що йде на зарядку паразитних та власних ємностей транзистора. Так, найбільша тривалість фронту спостерігається для схем, в яких навантажувальний елемент з ВАХ групи I. Відповідно такі схеми характеризуються найменшою швидкодією, проте найпростішою технологією виготовлення.

МДН інвертори з навантажувальними характеристиками III групи характеризуються більшою швидкодією. Це відбувається за рахунок того, що струми, які заряджають та розряджають ємність на виході схеми, стають співвимірними. Тому немає значної відмінності у тривалості фронтів при вмиканні та вимиканні схеми, що дозволяє підвищити загальну швидкодію схеми. Отже, з точки зору електричних властивостей в схемах на транзисторах з каналами однакового типу провідності доцільно використовувати в якості навантажувальних елементів транзистори з вбудованими каналами.

Однак найкращими електричними властивостями характеризуються МДН інвертори на комплементарних транзисторах. Їх швидкодія є найбільшою серед всіх видів ключових схем, оскільки перезарядка ємностей відбувається усім струмом, що протікає через відкритий транзистор. Крім того, такі схеми характеризуються мінімальною споживаною потужністю, оскільки в стаціонарних станах (ввімкненому та вимкненому) потужність від джерела живлення практично не споживається. Слід відмітити, що технологія виготовлення таких схем є найскладнішою серед усіх видів МДН інверторів.

Отже, логічні елементи на основі МДН транзисторів з однаковим типом провідності каналу займають мінімальну площу на кристалі, в той час як логічні елементи на основі МДН транзисторів з різним типом провідності каналу (комплементарні транзистори) забезпечують мінімальну споживану потужність, максимальну швидкодію та завадостійкість.

Елементною базою для побудови цифрових МДН схем є логічні елементи на основі інверторів, що виконують логічні операції І-НІ, АБО-НІ, І-АБО-НІ тощо. Для побудови багатовходової схеми АБО-НІ до одного навантажувального МДН транзистора стоком підключають m активних МДН транзисторів, витоки яких заземляють (m – це кількість входів цифрової схеми) (рис.10, а). У випадку КМДН логіки активні транзистори вмикаються паралельно, а відповідні їх пасивні транзистори – послідовно (рис.11, а).

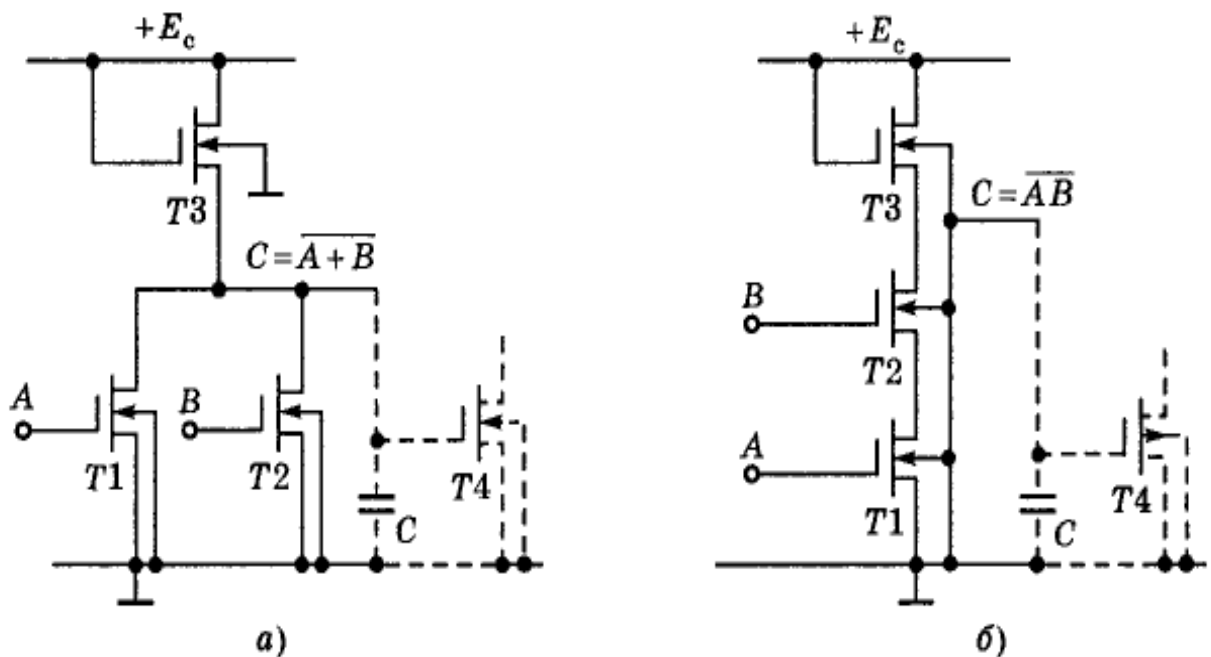


Рис.10. Логічні елементи на основі МДН інверторів, що виконують функцію: АБО-НІ (а) та І-НІ (б)

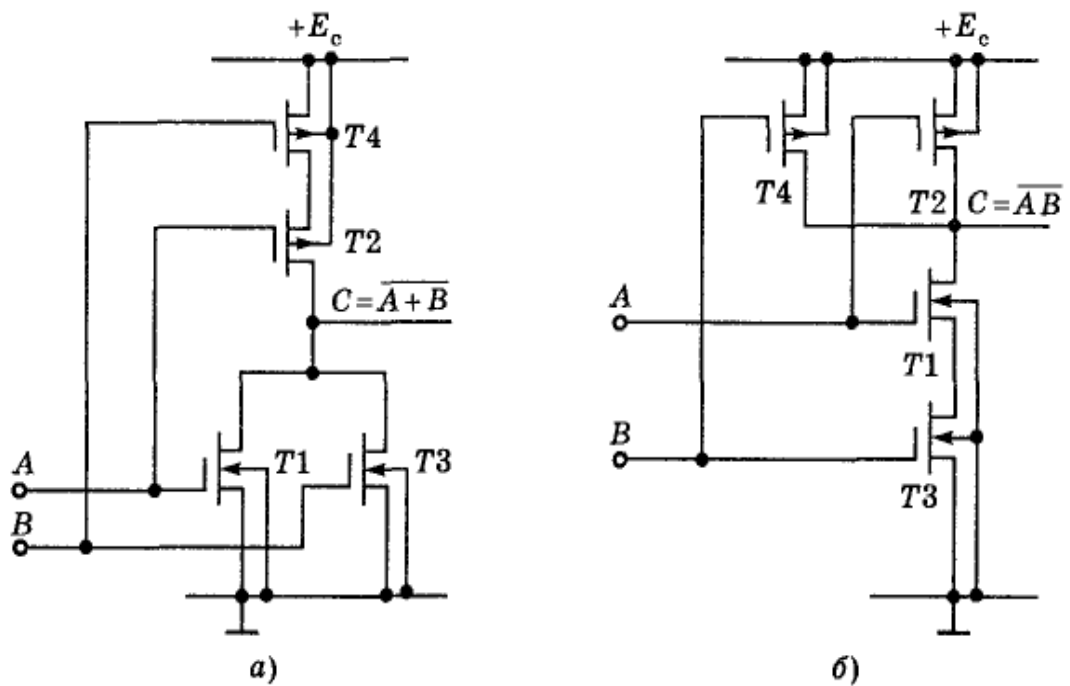


Рис.11. Логічні елементи на основі КМДН інверторів, що виконують функцію: АБО-НІ (а) та І-НІ (б)

Для побудови багатовходової схеми І-НІ до одного навантажувального МДН транзистора послідовно підключається перший активний МДН транзистор, до витоку якого підключається наступний активний МДН транзистор і т.д., витік найнижчого МДН транзистора у такому каскаді заземляють (рис.10, б). У випадку КМДН логіки активні транзистори вмикаються послідовно, а відповідні їх пасивні транзистори – паралельно (рис.11, б).

Основною електричною характеристикою МДН інвертора є пряма передавальна характеристика, вираз якої залежить від виду навантаження інвертора. Для схеми з нелінійним резистором вираз для передавальної характеристики має такий вид:

$$\left(1 - \frac{U_{вих}}{U_{жив} - U_{пор}^a}\right) = \sqrt{\frac{\beta_a}{\beta_n}} \left(\frac{U_{вх} - U_{пор}^n}{U_{жив} - U_{пор}^a} \right), \quad (1)$$

де $U_{вх}, U_{вих}, U_{жив}$ – вхідна напруга інвертора, вихідна напруга інвертора та напруга живлення схеми, $U_{пор}^a, U_{пор}^n$ – порогова напруга активного та пасивного транзисторів інвертора, β_a, β_n – питома крутизна активного та пасивного транзисторів інвертора.

Для схеми з струмо-стабілізуючим резистором вираз для передавальної характеристики має такий вид:

$$2 \cdot \beta_a \cdot \left((U_{вх} - U_{пор}^a) \cdot U_{вих} - \frac{U_{вих}^2}{2} \right) = \beta_n \cdot (U_{вих} - U_{пор}^n)^2. \quad (2)$$

Передавальна характеристика КМДН транзисторів набуває оптимальної форми, коли порогові напруги активного та пасивного транзистора рівні та в сумі дорівнюють напрузі живлення. Особливістю МДН інверторів на комплементарній парі транзисторів є практично відсутність споживання потужності, як у відкритому, так і в закритому стані. Це обумовлено тим, що в будь-який момент часу один з транзисторів є відкритим, а інший – закритим, а тому струм через КМДН інвертор рівний зворотному струму стокового р-п-переходу (10^{-9} А). Слід проте зауважити, що на передавальній характеристиці КМДН транзисторів можна виділити область, коли вхідна напруга рівна приблизно половині напруги живлення, обидва транзистора знаходяться у режимі насичення, тобто є відкритими одночасно. Максимальний струм споживання в такому режимі становить 400-500 мкА.

Вольт-амперна характеристика активного транзистора МДН інвертора не залежно від виду навантаження описується наступним виразом:

$$I_c = \beta_a \cdot \left((U_z - U_{пор}^a) \cdot U_c - \frac{1}{2} \cdot U_c^2 \right), \quad (3)$$

де I_c, U_c – струм та напруга на стоці, U_3 – напруга на затворі МДН транзистора.

Питома крутизна МДН транзистора залежить від параметрів матеріалу та розмірів його каналу:

$$\beta = \frac{\varepsilon_d \cdot \varepsilon_0 \cdot \mu_k}{d} \cdot \frac{W}{L}, \quad (4)$$

де ε_d – відносна діелектрична проникність діелектрика, ε_0 – електрична стала, μ_k – рухливість носіїв заряду в каналі (500 см²/В·с для п-канального транзистора та 200 см²/В·с для р-канального транзистора), d – товщина підзатворного діелектрика, W, L – ширина та довжина каналу.

Побудувавши сімейство передавальних характеристик в залежності від параметра $K = \frac{\beta_a}{\beta_n}$, можна проаналізувати вплив даного параметра на завадостійкість МДН інвертора. Завадостійкість по суті являє собою нечутливість інвертора до паразитних сигналів (завад). Завадостійкість інвертора з нелінійним чи динамічним навантаженням зростає при збільшенні відношення відносної крутизни активного та пасивного МДН транзисторів, а саме при $K \gg 10$. Оптимальна форма передавальної характеристики, а отже, максимальна завадостійкість, МДН інвертора на комплементарних транзисторах досягається при $K=1$, а це означає, що питома крутизна активного та пасивного транзистора має бути однакою. Слід мати на увазі, що рухливість носіїв заряду в каналі МДН транзисторів в комплементарній парі є суттєво різними. Тому для забезпечення умови $K=1$ потрібна різна ширина каналів МДН транзисторів при однаковій довжині так, щоб виконувалась рівність:

$$\frac{W_n}{W_a} = \frac{\mu_{\kappa}^a}{\mu_{\kappa}^n}, \quad (5)$$

де W_a, W_n – ширина каналу активного та пасивного транзистора, $\mu_{\kappa}^a, \mu_{\kappa}^n$ – рухливість носіїв заряду в каналі активного та пасивного транзистора.

МДН інвертори в статичному режимі характеризуються залишковим струмом (в закритому стані) та залишковою напругою (у відкритому стані). Відкритий МДН транзистор тим ближче за своїми властивостями до ідеального замкненого ключа, чим меншим є падіння напруги на ньому, яка називається залишковою напругою. Закритий МДН транзистор тим ближче за своїми властивостями до ідеального розімкненого ключа, чим меншим є струм, що протікає через нього, який називається залишковим струмом. В закритому МДН транзисторі залишковий струм являє собою зворотній струм стокового р-п-переходу, оскільки цей перехід працює при зворотному зміщенні, близькому до напруги живлення. Тому залишковий струм становить близько $10^{-9} \dots 10^{-10}$ А (за умови, що поверхня кристалу оброблена належним чином і на ній відсутні приповерхневі канали). При цьому залишкова напруга визначається типом навантаження:

- для схеми з нелінійним резистором

$$U_{зал} = \frac{\beta_n}{2 \cdot \beta_a} \cdot \frac{\left(U_{жив} - U_{пор}^n \right)^2}{U_{вх} - U_{пор}^a} \quad (6)$$

- для схеми з струмо-стабілізуючим резистором

$$U_{зал} = \frac{I_n}{\beta_a \cdot \left(U_{жив} - U_{пор}^a \right)} \quad (7)$$

– для схеми на комплементарних транзисторах

$$U_{зал} = \frac{I_{зал}}{\beta_a \cdot (U_{жив} - U_{пор}^a)} \quad (8)$$

Залишкова напруга в МДН інверторі з нелінійним чи динамічним навантаженням становить 0,1-0,2 В. Для того, щоб залишкова напруга в МДН інверторі була мінімальною повинно виконуватись співвідношення $\beta_n \ll \beta_a$, тому геометричні розміри транзисторів мають суттєво відрізнятись. Так, для активного транзистора відношення ширини до довжини каналу має бути якнайбільше, в той час як для пасивного транзистора інвертора таке відношення має бути якнайменше. Якщо забезпечити $\frac{\beta_a}{\beta_n} = 50 \dots 100$, то залишкова напруга становитиме 50...100 мВ.

Особливістю КМДН інвертора є мінімальні значення залишкової напруги, що на 1...2 порядки є меншими, аніж для МДН інверторів з іншими видами навантажень, розглянутих вище, і становить близько одиниць мкВ і менше.

3.2. Розрахунок електричних характеристик інтегральних логічних елементів

Порядок розрахунку електричних характеристик інтегральних логічних елементів наступний:

1. Побудувати схему логічного елемента згідно завдання варіанту, сформульованого в табл.1 та 2, керуючись міркуваннями щодо проектування схем МДН-інвертора, які викладені вище. Обґрунтувати

- вибір принципової схеми логічного елемента, вказавши при цьому її переваги і недоліки.
2. Вибрати величину порогової напруги активного транзистора логічного елемента зі співвідношення $0,2 \cdot U^0 \leq U_{пор} \leq 0,8 \cdot U^1$.
 3. Задати геометричні розміри активного та пасивного транзисторів логічного елемента (співвідношення ширини та довжини каналу) з точки зору умови забезпечення максимальної завадостійкості для даної схеми МДН інвертора.
 4. Розрахувати величину порогової напруги пасивного транзистора логічного елемента на основі виразу для передавальної характеристики МДН-інвертора (рівність 1-2).
 5. Розрахувати величину питомої крутизни активного та пасивного транзисторів логічного елемента на основі виразу для ВАХ активного МДН-транзистора та заданої величини завадостійкості для даної схеми МДН інвертора (рівність 3-5).
 6. Розрахувати товщину підзатворного діелектрика з виразу для питомої крутизни МДН-транзистора у логічному елементі (вираз 4).
 7. Визначити величину залишкової напруги МДН-інвертора на основі виразів 6 – 8.
 8. Розраховані параметри МДН інвертора звести в таблицю.
- Нижче наведено деякі приклади розрахунку МДН інверторів.

Приклад 1. Розрахувати електричні характеристики n-канального МДН інвертора, що виконує функцію І-НІ з нелінійним резистором у якості навантаження, якщо $U^1 = 3V$, $U_{жив} = 6V$, $I_n = 100\mu A$.

Оцінити величину напруги логічного нуля можна за формулою:

$$U^0 \approx 0,2 \cdot U^1 = 0,2 \cdot 3V = 0,6V$$

Величину порогової напруги активного транзистора логічного елемента вибираємо зі співвідношення:

$$0,2 \cdot U^0 \leq U_{пор} \leq 0,8 \cdot U^1.$$

$$0,12B \leq U_{пор} \leq 2,4B.$$

Для даного випадку $U_{пор}$ було обрано рівним 2 В (якщо транзистор з індукованим каналом) та -2 В (якщо транзистор з вбудованим каналом).

Для забезпечення достатньої завадостійкості K було обрано рівним 50, тобто:

$$K = \frac{\beta_a}{\beta_n} = 50 = \frac{W_a}{L_a} \cdot \frac{L_n}{W_n}.$$

Оскільки $\frac{W_a}{L_a} > 1$, а $\frac{W_n}{L_n} < 1$, то виберемо, що $\frac{W_a}{L_a} = 10$, а $\frac{L_n}{W_n} = 5$.

Розрахувати величину порогової напруги пасивного транзистора логічного елемента слід на основі виразу для передавальної характеристики МДН-інвертора (рівність 1):

$$U_{пор}^n = U^1 - \frac{1}{\sqrt{K}} \left(1 - \frac{U^0}{U_{жив} - U_{пор}^a} \right) (U_{жив} - U_{пор}^a) = 3B - \frac{1}{\sqrt{50}} \left(1 - \frac{0,6B}{6B - 2B} \right) (6B - 2B) \approx 2,5B$$

Щоб розрахувати величину питомої крутизни активного транзистора логічного елемента, скористаємось виразом для ВАХ активного МДН-транзистора:

$$\beta_a = \frac{I_c}{\left(U_3 - U_{пор}^a \right) \cdot U_c - \frac{1}{2} \cdot U_c^2} = \frac{100 \mu A}{(3B - 2B) \cdot 0,6B - \frac{1}{2} \cdot 0,6^2 B^2} \approx 0,24 \frac{mA}{B^2}$$

Для забезпечення максимальної завадостійкості інвертора необхідною умовою є перевищення питомої крутизни активного транзистора у 50 разів

величину питомої крутизни пасивного транзистора, тому

$$\beta_n = \frac{\beta_a}{50} = \frac{0,24 \frac{mA}{B^2}}{50} = 4,8 \frac{mA}{B^2}.$$

Товщина підзатворного діелектрика розраховується на основі виразу 4:

$$d = \frac{\varepsilon_{\partial} \cdot \varepsilon_0 \cdot \mu_k \cdot W}{\beta_a \cdot L} = \frac{4 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14} \frac{\Phi}{cm} \cdot 500 \frac{cm^2}{B \cdot c}}{0,24 \frac{mA}{B^2}} \cdot 10 = 73nm$$

Визначаємо величину залишкової напруги МДН-інвертора з нелінійним навантаженням:

$$U_{зал} = \frac{\beta_n}{2 \cdot \beta_a} \cdot \frac{\left(U_{жив} - U_{пор}^n \right)^2}{U_{вх} - U_{пор}^a} = \frac{1}{2 \cdot 50} \cdot \frac{(6B - 2,5B)^2}{3B - 2B} \approx 0,1B.$$

У випадку варіанту МДН транзисторів з каналом р-типу провідності всі розрахунки проводити аналогічно. Проте слід зауважити, що порогову напругу у наведені формули слід підставляти по модулю, а також при розрахунку товщини підзатворного діелектрику врахувати іншу величину рухливості дірок, на відміну від електронів.

Приклад 2. Розрахувати електричні характеристики п-канального МДН інвертора, що виконує функцію АБО-НІ з динамічним навантаженням, якщо $U^1 = 4B$, $U_{жив} = 8B$, $I_n = 120mA$.

Оцінити величину напруги логічного нуля можна за формулою:

$$U^0 \approx 0.2 \cdot U^1 = 0.2 \cdot 4B = 0.8B$$

Величину порогової напруги активного транзистора логічного елемента вибираємо зі співвідношення:

$$0,2 \cdot U^0 \leq U_{\text{пор}} \leq 0,8 \cdot U^1.$$

$$0,16B \leq U_{\text{пор}} \leq 3,2B.$$

Для даного випадку $U_{\text{пор}}$ було обрано рівним 3 В (якщо транзистор з індукованим каналом) та -3 В (якщо транзистор з вбудованим каналом).

Для забезпечення достатньої завадостійкості K було обрано рівним 50, тобто:

$$K = \frac{\beta_a}{\beta_n} = 50 = \frac{W_a}{L_a} \cdot \frac{L_n}{W_n}.$$

Оскільки $\frac{W_a}{L_a} > 1$, а $\frac{W_n}{L_n} < 1$, то виберемо, що $\frac{W_a}{L_a} = 10$, а $\frac{L_n}{W_n} = 5$.

Розрахувати величину порогової напруги пасивного транзистора логічного елемента слід на основі виразу для передавальної характеристики МДН-інвертора (рівність 2), подавши який у вигляді квадратного рівняння:

$$2 \cdot 50 \cdot \left((4B - 3B) \cdot 0,8B - \frac{(0,8B)^2}{2} \right) = \left(0,8B - U_{\text{пор}}^n \right)^2$$

$$U_{\text{пор}}^n - 1,6U_{\text{пор}}^n - 48 = 0.$$

З двох можливих коренів рівняння обираємо додатне значення порогової напруги 7,78 В.

Щоб розрахувати величину питомої крутизни активного транзистора логічного елемента, скористаємось виразом для ВАХ активного МДН-транзистора, врахувавши, що струм навантаження для логіки АБО-НІ ділиться навпіл:

$$\beta_a = \frac{I_c}{\left(U_z - U_{\text{пор}}^a \right) \cdot U_c - \frac{1}{2} \cdot U_c^2} = \frac{60 \mu\text{кА}}{(4B - 3B) \cdot 0,8B - \frac{1}{2} \cdot 0,8^2 B^2} \approx 0,125 \frac{\text{мА}}{B^2}$$

Для забезпечення максимальної завадостійкості інвертора необхідною умовою є перевищення питомої крутизни активного транзистора у 50 разів величину питомої крутизни пасивного транзистора, тому

$$\beta_n = \frac{\beta_a}{50} = \frac{0,125 \frac{mA}{B^2}}{50} = 2,5 \frac{мкА}{B^2}.$$

Товщина підзатворного діелектрика розраховується на основі виразу 4:

$$d = \frac{\varepsilon_{\partial} \cdot \varepsilon_0 \cdot \mu_K}{\beta_a} \cdot \frac{W}{L} = \frac{4 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \frac{\Phi}{cm} \cdot 500 \frac{cm^2}{B \cdot c}}{0,125 \frac{mA}{B^2}} \cdot 10 = 142_{nm}$$

Визначаємо величину залишкової напруги МДН-інвертора з динамічним навантаженням:

$$U_{зал} = \frac{I_n}{\beta_a \cdot (U_{жив} - U_{пор}^a)} = \frac{120_{мкА}}{0,125 \frac{mA}{B^2} \cdot (8B - 3B)} \approx 0,2B$$

У випадку варіанту МДН транзисторів з каналом р-типу провідності всі розрахунки проводити аналогічно. Проте слід зауважити, що порогову напругу у наведені формули слід підставляти по модулю, а також при розрахунку товщини підзатворного діелектрику врахувати іншу величину рухливості дірок, на відміну від електронів.

Приклад 3. Розрахувати електричні характеристики КМДН інвертора з п-канальним активним транзистором, що виконує функцію І-НІ, якщо $U^1 = 5B$, $U_{жив} = 6B$.

Оцінити величину напруги логічного нуля можна за формулою:

$$U^0 \approx 0,2 \cdot U^1 = 0,2 \cdot 5B = 1B$$

Величину порогової напруги активного транзистора логічного елемента вибираємо зі співвідношення:

$$0,2 \cdot U^0 \leq U_{пор} \leq 0,8 \cdot U^1.$$

$$0,2B \leq U_{пор} \leq 4B.$$

При цьому слід врахувати, що оптимальний режим роботи КМДН інвертора досягається, коли порогові напруги активного та пасивного транзисторів рівні і в сумі становлять напругу живлення. Тому для даного випадку $U_{пор}$ було обрано рівним 3 В.

Щоб задати геометричні розміри КМДН інвертора, слід скористатись рівністю 5:

$$\frac{W_n}{W_a} = \frac{\mu_{\kappa}^a}{\mu_{\kappa}^n} = \frac{500 \frac{cm^2}{B \cdot c}}{200 \frac{cm^2}{B \cdot c}} = 2,5$$

Оскільки довжина каналу в обох транзисторах однакова, задамо мінімально можливим значенням для даної технології 10 мкм, ширина каналу активного транзистора має бути більшою, аніж довжина (оптимально у 5-10 разів), тому приймаємо рівною 100 мкм, а ширина каналу пасивного транзистора відповідно – 250 мкм.

Щоб розрахувати величину питомої крутизни активного транзистора логічного елемента, скористаємось виразом для ВАХ активного МДН-транзистора, за умови, коли обидва транзистора КМДН інвертора знаходяться в стані насичення:

$$\beta_a = \frac{I_c}{\left(U_3 - U_{пор}^a \right) \cdot U_c - \frac{1}{2} \cdot U_c^2} = \frac{400 \mu A}{(5B - 3B) \cdot 1B - \frac{1}{2} \cdot 1^2 B} \approx 0,27 \frac{mA}{B^2}$$

Для забезпечення максимальної завадостійкості інвертора необхідною умовою є рівність питомої крутизни активного та пасивного транзистора, тому $\beta_a = \beta_n = 0,27 \frac{mA}{B^2}$. Товщина підзатворного діелектрика розраховується на основі виразу 4:

$$d = \frac{\varepsilon_d \cdot \varepsilon_0 \cdot \mu_k}{\beta_a} \cdot \frac{W}{L} = \frac{4 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14} \frac{\Phi}{cm} \cdot 500 \frac{cm^2}{B \cdot c}}{0,27 \frac{mA}{B^2}} \cdot 10 = 65,5 nm$$

Визначаємо величину залишкової напруги КМДН-інвертора:

$$U_{зал} = \frac{I_{зал}}{\beta_a \cdot (U_{жив} - U_{пор}^a)} = \frac{10^{-9} A}{0,27 \frac{mA}{B^2} \cdot (6B - 3B)} = 1,2 мкВ$$

3.3. Розробка технології виготовлення інтегральної мікросхеми

Розробка технології виготовлення логічного елемента розпочинається з вибору марки підкладки. У промисловості використовують 2 найбільш поширені марки кремнієвих підкладок – КДБ (кремній дірковий, легований бором) та КЕФ (кремній електронний, легований фосфором). Вибір марки, очевидно, визначається типом провідності каналу МДН структури. Величина питомого опору матеріалу підкладки розраховується на основі концентрації домішків у ній та рухливості носіїв заряду (для електронів та дірок 0,15 та 0,06 м²/В·с відповідно). Концентрація домішків у підкладці пов'язана з величиною порогової напруги та товщиною підзатворного діелектрику, які були визначені у першій частині роботи, графічною залежністю, наведеною на рис.4.

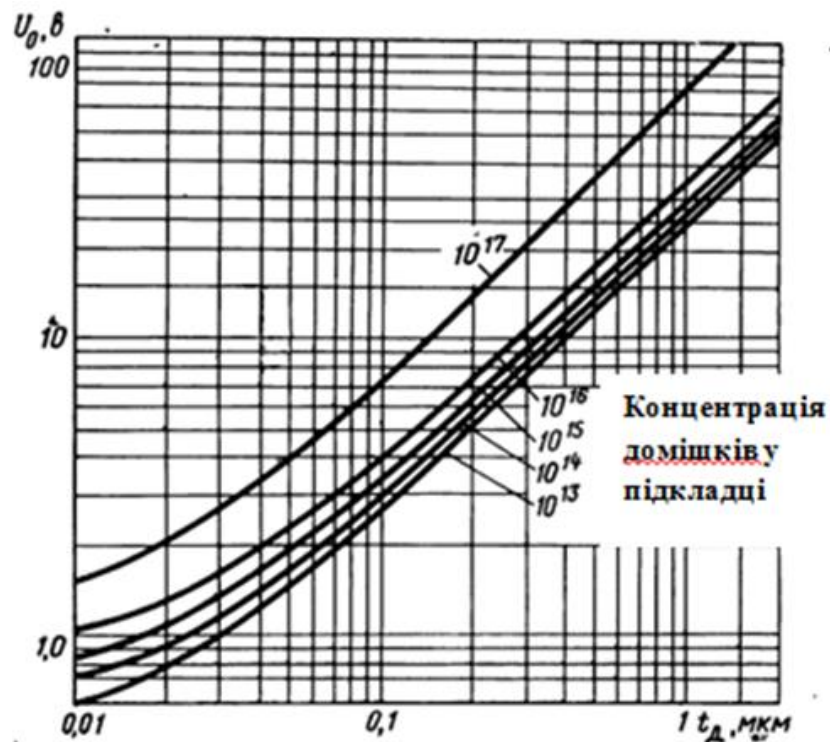


Рис.4. Залежність порогової напруги МДН транзистора від товщини діелектрику та концентрації домішків у підкладці

Величина питомого опору підкладки визначається наступними факторами: пороговою напругою, напругою пробою стік-підкладка, стабільністю напівпровідникового матеріалу.

У випадку високого питомого опору матеріалу $\rho > 1$ Ом·см порогова напруга в основному визначається зарядом поверхневих станів в окислі. При зменшенні питомого опору матеріалу менше 1 Ом·см порогова напруга починає сильно залежати від питомого опору матеріалу і перевищує 5 – 6 В.

Напруга пробою стік-підкладка безпосередньо залежить від питомого опору матеріалу: чим вищий питомий опір, тим вища напруга пробою. Однак верхнє значення величини питомого опору обмежується наступними факторами:

- При збільшенні питомого опору напівпровідника різко погіршується стабільність параметрів матеріалу в процесі виготовлення МДН ІС. Наприклад, у матеріалу з питомим опором $10^2 - 10^3$ Ом·см в процесі

технологічних високотемпературних обробок може змінюватись як величина питомого опору, так і тип провідності матеріалу.

- У випадку слабколегованої підкладки області об'ємного заряду стоку та витоку одного і того ж чи сусідніх транзисторів можуть дотикатись, викликаючи прокол транзистора.

Тому в промисловості для виготовлення МДН ІС використовують кремнієві підкладки з $\rho=1 - 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Значну роль відіграє орієнтація поверхні підкладки. Так, кремнієві підкладки з орієнтацією (100) характеризуються значно меншою густиною поверхневих станів (майже на порядок), аніж поверхня кремнію з орієнтацією (111).

Послідовність технологічних операцій для виготовлення МДН ІС на транзисторах р-типу провідності наведена на рис.5.

В якості вихідного матеріалу застосовують кремнієві пластини n-типу з питомим опором 2,5-10 Ом·см. Після хімічного очищення пластин на їх поверхні створюють маскуючий шар SiO_2 (рис.5,а), в якому методом фотолітографії формують вікна до областей стоку та витоку (рис.5, б). Далі проводять двохстадійну дифузію бору, створюючи високолеговані області витоку та стоку глибиною 1 – 2 мкм (рис.5, в). Наступна фотолітографія відкриває вікна для формування тонкого окисла підзатворного діелектрику товщиною 50-150 нм (рис.5, г). Тонкий SiO_2 утворюють методом термічного окислення у сухому кисню (рис.5, д). Наступна фотолітографія дає змогу відкрити контактні вікна (рис.5, е), а осадження алюмінію – реалізувати омічні контакти до областей стоку та витоку (рис.5, ж). Формування геометрії контактної металізації здійснюється завдяки фотолітографічним процесам (рис.5, з). Закінчується процес виготовлення МДН ІС операцією пасивації поверхні мікросхеми фосфоро-силікатним склом.

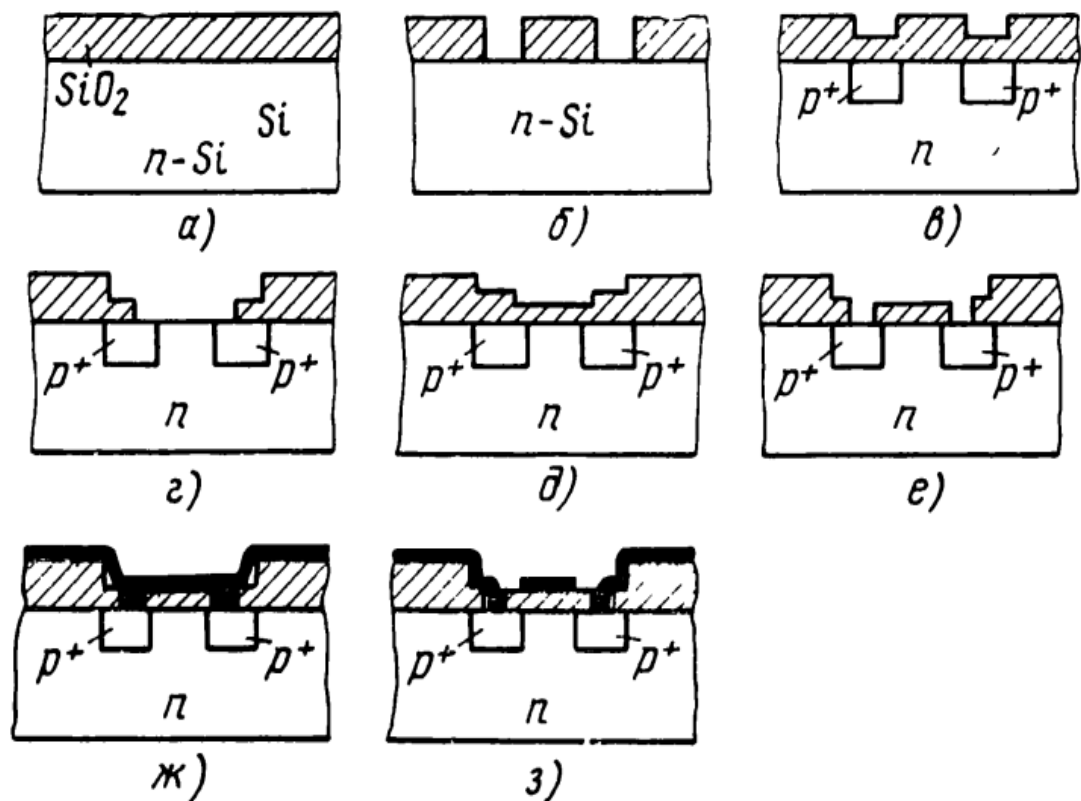


Рис.5. Технологічна схема створення МДН ІС на транзисторах одного типу провідності:

а – первинне окислення, б – I фотолітографія: відкривання вікон стік-витік, в – дифузія областей стік-витік, г – II фотолітографія: створення вікна для тонкого окисла, д – вирощування тонкого окисла, е – III фотолітографія: відкривання контактних вікон, ж – осадження алюмінію, з – IV фотолітографія: формування геометрії контактної металізації

За таким же ж технологічним маршрутом можуть бути виготовлені МДН ІС на транзисторах n-типу провідності з наступними відмінностями: в якості вихідної пластини використовують кремній р-типу провідності, а формування областей стоку та витоку здійснюють дифузією фосфору.

Однією із найбільш відповідальних технологічних операцій, якість виконання якої напряду впливає на вихід придатних мікросхем, є процес окислення кремнію. Технологічна операція окислення дає змогу отримати на поверхні кремнієвої пластини плівку діоксиду кремнію, яка може виконувати наступні функції в МДН ІС:

- функцію захисту – пасивації поверхні мікросхеми, зокрема захисту вертикальних ділянок р-n-переходів, що виходять на поверхню;
- функцію маски, крізь вікна у якій вводять необхідні домішки для створення легованих областей;
- функцію тонкого діелектрику під затвором МДН транзистора.

В технології ІС розрізняють товсті та тонкі плівки діоксиду кремнію. Товсті плівки товщиною 0,5 – 1 мкм виконують роль захисту та маскування, в той час як тонкі оксиди товщиною 0,02 – 0,15 мкм виконують роль підзатворного діелектрика МДН транзистора.

Поверхня кремнію завжди вкрита власною окисною плівкою, що з'являється на його поверхні в результаті природнього окислення навіть за порівняно низьких температур. Однак така плівка має надто малу товщину (близько 5 нм), щоб виконувати одну з вищезгаданих функцій. Тому плівки діоксиду кремнію формують штучним шляхом одним із наступних методів – термічного окислення, анодного окислення та піролітичного осадження окисла. Найбільш поширеним способом формування плівки SiO_2 є метод термічного окислення, що може проходити у сухому кисню, вологому кисню, парах води та в різних комбінаціях з них.

Окислення кремнію в потоці сухого кисню проходить при температурах 1000 – 1300°C та атмосферному тиску. Окислення кремнію у вологому кисню чи парах води може відбуватись при нижчих температурах (600 – 1100°C) та зі значно більшими швидкостями, аніж при окисненні у сухому кисню.

В промисловості досить часто користуються комбінацією різних режимів формування плівки діоксиду кремнію. Спочатку тонкий шар SiO_2 формують методом окислення у сухому кисню, далі нарощують більш товстий шар у вологому кисню і завершують процес окислення знову обробкою у сухому кисню. Таке комбіноване окислення забезпечує, з одного боку, отримання необхідних властивостей межі поділу $\text{Si} - \text{SiO}_2$, а з іншого боку, за мінімально можливих температур та часів окислення одержання

шару діоксиду кремнію заданої товщини. Скорочення тривалості процесу окислення та його температури є необхідними для того, щоб звести до мінімуму розгонку домішків при окисненні, тим самим зберігши характеристики р-п-переходів на заданому рівні. Проте слід відмітити про зростання густини дефектів всередині сформованого таким чином окислу порівняно з методом окислення у сухому кисню.

Застосування плівок SiO_2 з метою маскування під час дифузії домішків базується на тому, що коефіцієнти дифузії цих домішків (Р, В, As, Sb тощо) в ній значно менші, ніж в кремнії. Для миш'яку, бору та сурми досить товщини окислу 0,5 мкм, в той час як для дифузії фосфору маска має мати товщину 1 мкм.

Залежність товщини оксиду W від часу окиснення t при $0,03 < W < 0,5$ мкм описується добре відомим лінійно-параболічним законом:

$$\frac{W^2}{K_p} + \frac{W}{K_L} = t + t_0 \quad (9)$$

де t_0 – величина, що враховує відхилення залежності $W(t)$ від цього закону при малих W і початкову величину $W(0)$; K_p, K_L – відповідно параболічний та лінійний коефіцієнти окиснення, які залежать від умов окиснення:

- для сухого кисню:

$$K_p = 12.9 \exp\left(\frac{-1.23}{kT}\right) \quad (10)$$

$$K_L = 1.04 \cdot 10^5 \exp\left(\frac{-2}{kT}\right) \quad (11)$$

- для окиснення в парах води:

$$K_p = 280 \exp\left(\frac{-1.17}{kT}\right), \quad T \leq 950^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$K_p = 7 \exp\left(\frac{-0.78}{kT}\right), \quad T > 950^\circ\text{C} \quad (13)$$

$$K_L = 3.45 \cdot 10^4 \exp\left(\frac{-1.6}{kT}\right), \quad T \leq 900^\circ\text{C} \quad (14)$$

$$K_L = 2.95 \cdot 10^6 \exp\left(\frac{-2.05}{kT}\right), \quad T > 900^\circ\text{C} \quad (15)$$

де K_p – параболічний коефіцієнт, $\text{мкм}^2/\text{с}$, K_L – лінійний коефіцієнт, $\text{мкм}/\text{с}$.

Залежності K_p та K_L подано для кристалографічної орієнтації кремнію (111). При окисненні кремнію з орієнтацією (100) має місце зменшення K_L у 1,68 рази у порівнянні з орієнтацією (111), в той час як коефіцієнт K_p практично не залежить від орієнтації пластини.

Якщо МДН транзистори містять вбудований канал, то технологічний маршрут виготовлення доповнюється операцією іонної імплантації домішків відповідного типу. Іонне легування – це технологічна операція введення домішків до пластини шляхом бомбардування її іонами домішків, прискореними до енергії, якої достатньо для введення домішків у тверде тіло. Іонізація атомів домішок, прискорення іонів та фокусування іонного променя здійснюється в спеціальних вакуумних системах. В якості домішок використовують ті ж елементи, що й під час дифузії.

Глибина введення іонів залежить від їх енергії та маси. Чим більша енергія іонів, тим більшою є товщина імплантованого шару. Однак з ростом енергії імплантованих іонів зростає і кількість радіаційних дефектів в кристалі, тобто погіршуються його електрофізичні параметри. Тому енергію іонів обмежують величиною 100 – 150 кеВ. Нижній рівень становить 5 – 10

кеВ. За такого діапазону енергій іонів глибина імпантованого шару становить 0,1 – 0,4 мкм.

Концентрація домішків в імпантованому шарі залежить від густини струму в іонному промені та часу процесу імпантації (часу експозиції). В залежності від густини струму та заданої об'ємної концентрації домішків в шарі час експозиції змінюється від декількох секунд до 3 – 5 хв. Зрозуміло, що чим більшим є час експозиції, тим більшою буде кількість радіаційних дефектів.

Після завершення процесу імпантації пластина підлягає відпалу при температурах 500 – 800 °С для того, щоб впорядкувати кристалічну ґратку матеріалу та усунути хоча б частково наявні радіаційні дефекти.

Взагалі іонну імпантацію можна проводити багатократно, як і дифузію, вбудовуючи один шар в інший. Однак поєднання енергії іонів, часу експозиції та режиму відпалу для кожного такого шару при багатократній імпантації є важкою задачею. Тому іонна імпантація набула найбільшого поширення для створення тонких одинарних шарів.

Основними перевагами даного методу є низька температура процесу та його гарна контрольованість.

Концентрація домішків у каналі МДН транзистора, як правило, дещо перевищує концентрацію домішків у підкладці (на 1-2 порядки). Доза легування, яка при цьому має бути використана, щоб отримати задане значення концентрації розраховується за формулою:

$$D_s = N_d \cdot q \cdot x_i, \quad (16)$$

де N_d – концентрація домішків в легуваному шарі, q – елементарний заряд, x_i – глибина вбудованого шару. Доза легування виражається, як правило, в мкКл/см².

Загальна кількість атомів, що вводяться в одиницю поверхні кристалу, визначається виразом:

$$Q_I = \frac{D_s}{n \cdot q} = \frac{j \cdot t}{n \cdot q}, \quad (17)$$

де n – ступінь іонізації іонів в іонному промені (рівна 1, 2 або 3), j – густина іонного струму, яка виражається в мкА/см², а t – час експозиції, що виражається в секундах.

Розподіл концентрації легуючої домішки у підкладці для випадку $\gamma = 0$, має наступний вигляд:

$$C = \frac{Q_I \exp \left[-\frac{(x - R_m)^2}{2\sigma_m^2} \right]}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} \pm C_0, \quad (18)$$

де σ_m , R_m – параметри розподілу, які в залежності від енергії іонів визначаються з табл.5, C_0 – початкова концентрація домішків у пластині (до початку іонного легування). Товщина імплантованого шару визначається по відстані, на якій концентрація введених домішків співвимірна з концентрацією домішків у підкладці.

Для створення КМДН ІС необхідно в одному кристалі створити дві області монокристалічного кремнію р- та n-типу електропровідності. Існує три технологічних підходи для створення КМДН ІС: створення “кишені” р-типу в кремнії n-типу та навпаки за допомогою селективної дифузії; створення “кишені” р-типу в кремнії n-типу та навпаки за допомогою епітаксії; з’єднання між собою МДН транзисторів, виготовлених на пластинах різного типу електропровідності. Найбільш простим з них являється перший метод, оскільки другий підхід потребує використання складної операції “рельєфної епітаксії”, а третій – спеціальних методів зборки.

Послідовність технологічних операцій для виготовлення КМДН ІС наведена на рис.6. Після хімічного очищення пластин на їх поверхні створюють маскуєний шар SiO₂ (рис.6,а), в якому методом фотолітографії

формують вікна до області “кишені” (рис.6, б). Далі проводять двохстадійну дифузію бору на необхідну глибину, рівень легування при цьому має бути низьким (10^{17} см^{-3}), однак достатнім для перекомпенсації наявних у підкладці домішків протилежного знаку (рис.6, в).

Після цього за допомогою фотолітографії та дифузії по черзі формують області стоку та витоку у напівпровідникових областях n- та p-типу (рис.6, г, д, е, ж). Наступна фотолітографія відкриває вікна для формування тонкого окисла підзатворного діелектрику товщиною 50-150 нм (рис.6, з). Тонкий SiO_2 утворюють методом термічного окислення у сухому кисню (рис.6, и).

Далі фотолітографія дає змогу відкрити контактні вікна (рис.6, к), а осадження алюмінію з наступною фотолітографією – реалізувати омичні контакти до областей стоку та витоку (рис.6, л). Закінчується процес виготовлення КМДН ІС операцією пасивації поверхні мікросхеми фосфоросилікатним склом.

Отже, особливістю технології КМДН ІС є наявність додаткової технологічної операції по створенню області кишені методом дифузії (глибина 4 – 7 мкм). На відміну від дифузійних процесів по створенню областей стоку та витоку процес дифузії в даному випадку повинен забезпечити рівень легування значно менший, ніж максимальна межа розчинності даної домішки в кремнію, проте на 1-2 порядки більший, ніж рівень легування підкладки.

Для цього використовують двохстадійний процес дифузії (загонка та розгонка). На першому етапі здійснюють початкове введення домішки у пластину. На другому етапі добиваються проникнення домішки вглиб напівпровідника (перерозподіл концентрацій). Для кремнію дифузію проводять в діапазоні 1000 – 1300°C. Нижче 1000°C коефіцієнти дифузії домішків досить малі і відповідно глибина дифузії незначна. Вище 1300°C якість дифузійних шарів є незадовільною внаслідок порушення поверхні під впливом високої температури.

Таблиця 5. Параметри функції розподілу для різних домішок в процесі іонної імплантації

| Іон | Параметр | Прискорююча енергія, кеВ | | | | Одиниця виміру |
|-----|------------|--------------------------|------|------|------|----------------|
| | | 20 | 40 | 60 | 80 | |
| В | R_m | 734 | 1610 | 2438 | 3238 | 10^{-4} мкм |
| | σ_m | 321 | 538 | 708 | 839 | 10^{-4} мкм |
| Р | R_m | 260 | 490 | 732 | 980 | 10^{-4} мкм |
| | σ_m | 94 | 164 | 231 | 295 | 10^{-4} мкм |
| Ga | R_m | 163 | 280 | 392 | 502 | 10^{-4} мкм |
| | σ_m | 40 | 67 | 91 | 115 | 10^{-4} мкм |
| As | R_m | 159 | 271 | 377 | 481 | 10^{-4} мкм |
| | σ_m | 37 | 62 | 84 | 105 | 10^{-4} мкм |
| In | R_m | 141 | 231 | 312 | 390 | 10^{-4} мкм |
| | σ_m | 25 | 40 | 53 | 66 | 10^{-4} мкм |
| Sb | R_m | 140 | 229 | 308 | 384 | 10^{-4} мкм |
| | σ_m | 24 | 38 | 51 | 63 | 10^{-4} мкм |

Дифузія – це технологічна операція введення домішків в напівпровідникову пластину при високій температурі. Теорія дифузії описується двома законами Фіка, розв’язок яких за двох крайніх випадків має наступний вигляд.

При проведенні першого етапу (загонки) можна вважати, що в початковий момент в тілі пластини відсутні домішки даного типу, а на межі розділу між зовнішнім середовищем і напівпровідником існує нескінченне джерело домішкових атомів з постійною концентрацією атомів домішки C_0 , яка не змінюється протягом всього процесу дифузії. В цьому випадку концентрація домішків описується виразом:

$$C = C_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (19)$$

де C – концентрація речовини, що дифундує, C_0 – максимальна концентрація даної домішки на поверхні кремнію (межа розчинності), D – коефіцієнт дифузії, t – тривалість процесу загонки, x – глибина дифузії.

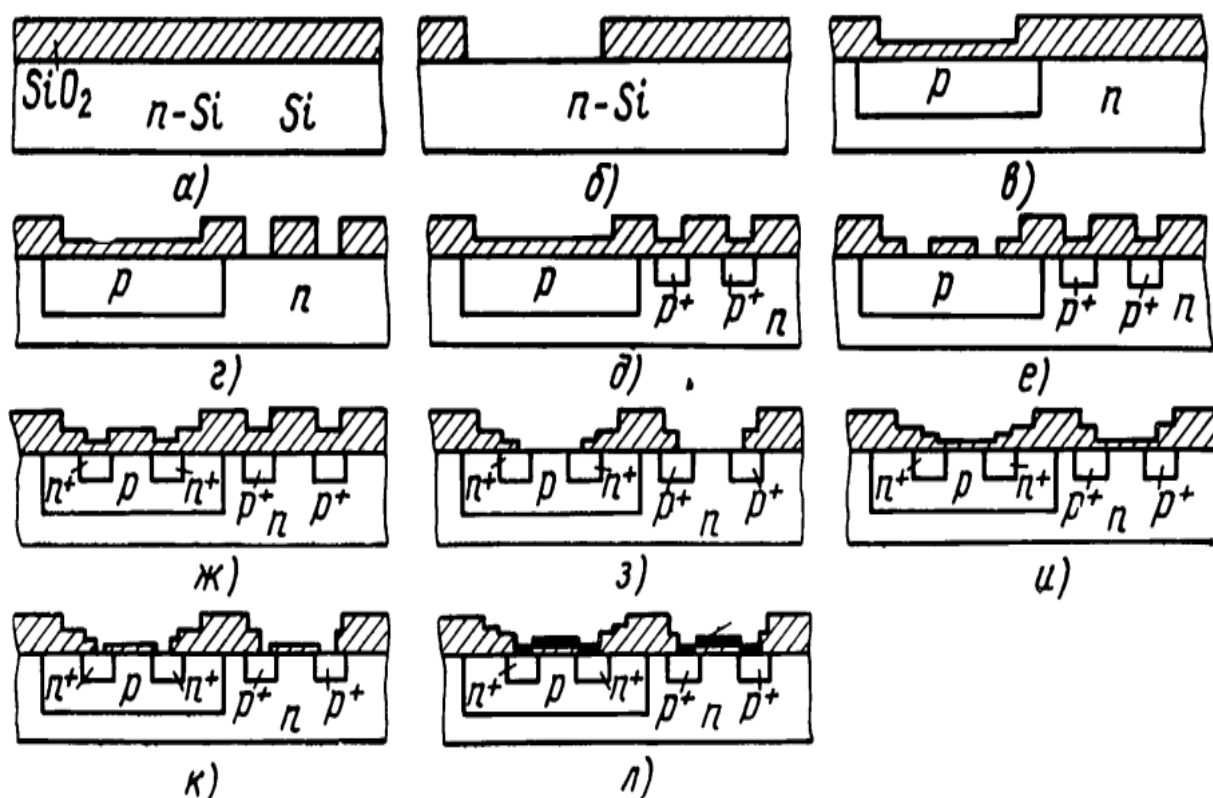


Рис.6. Технологічна схема створення МДН ІС на транзисторах взаємодоповнюючих типів провідності (КМДН ІС): а – первинне окислення, б – I фотолітографія: створення “кишені”, в – дифузія області “кишені”, г – II фотолітографія: відкривання вікон стік-витік першого транзистора, д – дифузія областей стік-витік, е – III фотолітографія: відкривання вікон стік-витік другого транзистора, ж – дифузія областей стік-витік, з – IV фотолітографія: створення вікна для тонкого окисла, и – вирощування тонкого окисла, к – V фотолітографія: відкривання контактних вікон, л – осадження алюмінію та VI фотолітографія: формування геометрії контактної металізації

При проведенні другого етапу (розгонки) маємо задану кількість атомів домішки S , що в початковий момент розподілена певним чином і під дією дифузії перерозподіляється в тілі пластини. Кількість атомів домішки може бути визначена за формулою:

$$S = \int_0^{\infty} C(x, t_0) dx \quad (20)$$

На практиці при інтегруванні можна обмежитись тілом пластини. З урахуванням того факту, що величина S у тілі пластини залишається незмінною протягом всього процесу, а відбувається лише перерозподіл домішки, аналітичний розв'язок для процесу розгонки має наступний вигляд:

$$C = \frac{S}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (21)$$

На рис.7. наведено розподіл концентрації домішки під час дифузії з необмеженого (а) та обмеженого (б) джерела дифузії та різної тривалості обох режимів дифузії. Під глибиною дифузійного шару розуміють координату $x=L_n$, за якої концентрація введеної домішки N дорівнює вихідній концентрації домішків у підкладці N_0 .

Апроксимуючи функцію $\operatorname{erfc}(z)$ експоненціальною функцією, можна отримати глибину дифузії на стадії загонки домішки:

$$L_n = 2\sqrt{Dt} \left(\sqrt{\ln\left(\frac{C_0}{C_B}\right)} - 0.3 \right), \quad (22)$$

де C_B – концентрація домішків у підкладці.

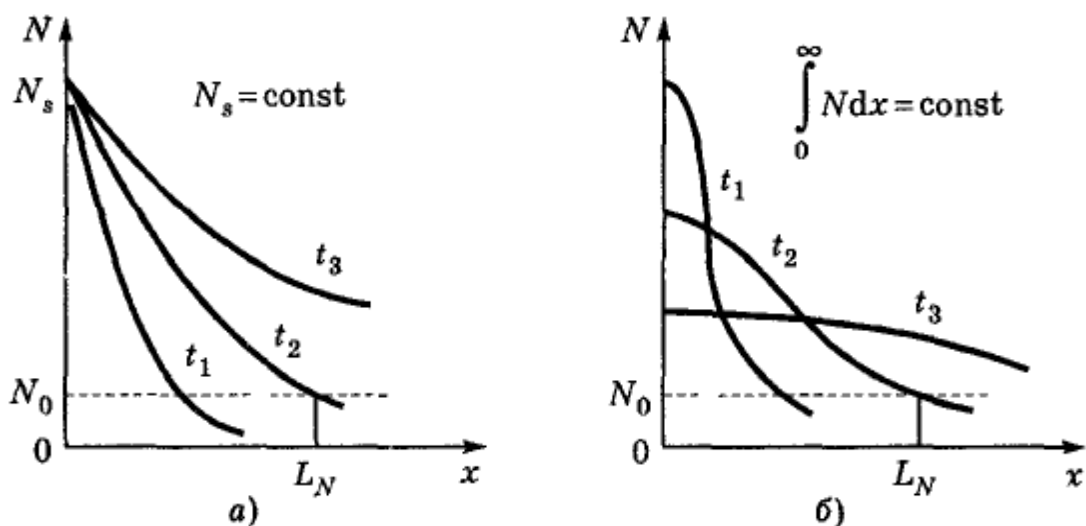


Рис.7. Розподіл концентрації домішки під час дифузії з необмеженого (а) та обмеженого (б) джерела дифузії

Логарифмуючи обидві частини рівності для розподілу концентрації при дифузії з обмеженого джерела, можна отримати глибину дифузії на стадії розгонки домішки:

$$L_n = 2\sqrt{Dt} \sqrt{\ln\left(\frac{C_0}{C_B}\right)} \quad (23)$$

Для визначення параметрів режимів двохстадійної дифузії розрахунок починають з розрахунку параметрів процесу розгонки, а саме: задаючи температуру процесу (а, отже, величину коефіцієнту дифузії даної домішки), можна встановити тривалість даного етапу.

Коефіцієнт дифузії D в загальному випадку є функцією температури та інших факторів і може бути обчислений за формулою:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (24)$$

де T – абсолютна температура системи, $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ (Дж/К) – стала Больцмана, E_a – енергія активації, D_0 – стала дифузії.

Деякі константи для розрахунку коефіцієнту дифузії найбільш використовуваних домішок наведені у табл.6.

Таблиця 6. Константи дифузії та енергії активації домішок при дифузії у власний кремній

| Параметр | Розмірність | Матеріал | | |
|----------|--------------------|----------|------|-------|
| | | B | P | Sb |
| D_0 | см ² /с | 0,76 | 3,85 | 0,214 |
| E_a | еВ | 3,46 | 3,66 | 3,65 |

Тривалість процесу загонки домішки співвідноситься з тривалістю розгонки домішки за формулою:

$$t_1 = \frac{D_2}{D_1} \left(\frac{\pi C_{02}}{2 C_{01}} \right)^2 t_2, \quad (25)$$

де t_1 , t_2 – тривалість процесу загонки та розгонки відповідно, D_1 , D_2 – коефіцієнти дифузії домішків при температурі процесу загонки та розгонки відповідно, C_{01} , C_{02} – максимальна концентрація даної домішки на поверхні кремнію (межа розчинності) на стадії загонки та задана концентрація даної домішки після стадії розгонки відповідно.

Задавши температуру, за якої розчинність даної домішки в кремнію є максимальною (табл.7), можна розрахувати тривалість процесу загонки домішки.

Максимальна межа розчинності типових домішок у кремнії наведено у табл.7.

Кількість атомів домішки, яку необхідно ввести на стадії загонки домішки:

$$S = C_{02} \sqrt{\pi D_2 t_2} \quad (26)$$

Таблиця 7. Максимальна межа розчинності типових домішок у кремнії

| Домішка | As | P | B | Sb |
|-----------------------|--------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| $C_0, \text{см}^{-3}$ | $20 \cdot 10^{20}$ | $13 \cdot 10^{20}$ | $5 \cdot 10^{20}$ | $0,6 \cdot 10^{20}$ |
| T, °C | 1150 | 1150 | 1200 | 1300 |

Профіль розподілу домішки після двохстадійного процесу дифузії можна описати виразом:

$$C(x,t) = \frac{2C_{01}}{\pi} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) \quad (27)$$

3.4. Розрахунок параметрів технологічних процесів для виготовлення інтегральної мікросхеми

Порядок виконання розрахунку технологічних параметрів виготовлення логічного елемента наведено нижче.

1. Скласти технологічну карту процесу виготовлення МДН інвертора розробленої схеми, керуючись рекомендаціями по розробці МДН технології, викладеними вище.

2. Обґрунтувати вибір матеріалів та конкретних технологічних операцій у розробленій технологічній карті. Зокрема здійснити вибір марки підкладки (КДБ чи КЕФ), визначити її питомий опір на основі розрахованої величини порогової напруги та товщини підзатворного діелектрика за допомогою графіку (рис.4), обґрунтувати вибір орієнтації пластини.

3. На основі визначених електричних параметрів МДН інверторів здійснити розрахунок технологічних параметрів одного із процесів їх виготовлення, вказаного у варіанті завдання (табл..3) – процесу термічного окислення кремнію, іонної імплантації та дифузії.

Розрахунок процесу термічного окислення кремнію.

1. Обґрунтувати вибір середовища для окислення (сухий кисень, вологий кисень, пари води чи чергування сухий кисень-вологий кисень-сухий кисень).
2. Побудувати залежність часу окислення від температури для розрахованої у першій частині курсової роботи товщини підзатворного діелектрика.
3. Обрати оптимальний температурно-часовий режим окислення для одержання підзатворного діелектрика даної товщини.

Розрахунок процесу іонної імплантації.

1. Обґрунтувати вибір певного типу домішки для створення вбудованого каналу. Задати рівень легування та глибину вбудованого каналу на основі розрахунків, проведених у першій частині курсової роботи. Визначити, якою для цього має бути доза легуючої домішки.
2. Побудувати залежність розподілу концентрації легуючої домішки у підкладці за різної енергії іонів. Встановити енергію іонів, яка забезпечить створення каналу заданої глибини.
3. Розрахувати час легування іонним променем густиною 100 мкА/м^2 .

Розрахунок процесу дифузії.

1. Обґрунтувати вибір певного типу домішки для створення кишені. Задати рівень легування та глибину кишені на основі розрахунків, проведених у першій частині курсової роботи.
2. Розрахувати час процесу розгонки домішки задавши різні температури. Побудувати графічну залежність часу процесу розгонки домішки від

температури процесу. Обрати оптимальний температурно-часовий режим процесу розгонки для даної глибини кишені.

3. Задати температуру процесу загонки для вказаної граничної межі розчинності даної домішки у кремнію і розрахувати тривалість процесу загонки та кількість атомів домішки, яку необхідно ввести на даній стадії, щоб забезпечити задану глибину кишені та концентрацію домішки в ньому.

4. ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Пояснювальна записка курсової роботи представляє собою друкований документ, об'ємом 25 – 30 сторінок формату А4. Текст пояснювальної записки друкується на одній стороні аркуша паперу. Скріплюється робота в папку-скоросшивач з прозорою першою сторінкою.

Структура пояснювальної записки курсової роботи:

1. Титульний аркуш.
2. Зміст.
3. Перелік використаних скорочень.
4. Вступ.
5. Завдання.
6. Аналіз завдання.
7. Принципова схема логічного елемента та обґрунтування вибору саме такої схеми.
8. Розрахунок інтегральних елементів.
9. Технологія виготовлення з обґрунтуванням вибору тих чи інших технологічних операцій.
10. Розрахунок параметрів технологічних процесів, вказаних у завданні.
11. Лістинги програм (за необхідності).
12. Висновок. У висновку підводиться підсумок виконаної роботи, аналіз отриманих результатів.
13. Перелік використаної літератури.
14. Додатки (за необхідності).

Пояснювальну записку друкують шрифтом Times New Roman, 14 кеглем, з 1,5 міжрядковим інтервалом. Відступи від краю сторінки (поля), мм: зверху – 20; зліва – 25; справа – 10; знизу – 20. Весь текст пояснювальної записки необхідно вирівнювати по ширині сторінки. Абзацний відступ

повинен бути однаковим впродовж усього тексту і дорівнювати 1,25 см. Відступи в тексті перед та після абзаців не робити.

Відстань між заголовком і подальшим чи попереднім текстом має дорівнювати двом рядкам. Відстань між основами рядків заголовку, а також між двома заголовками приймають такою, як у тексті. Не допускається розміщувати назву розділу, підрозділу, а також пункту й підпункту в нижній частині сторінки, якщо після неї розміщено тільки один рядок тексту.

Всі листи пояснювальної записки, крім титульного повинні мати наскрізну нумерацію. Таблицям, рисункам та формулам також присвоюється наскрізна нумерація.

Перелік використаних скорочень повинен розташовуватись стовпцем. Ліворуч в алфавітному порядку наводять умовні позначення, символи, одиниці, скорочення і терміни, праворуч через тире – їх детальну розшифровку. Спочатку наводять скорочення українською мовою, за ними – іноземними (з перекладом на мову написання пояснювальної записки).

Рисунки та таблиці повинні мати пояснення в тексті роботи. Всі рисунки та таблиці розміщуються в пояснювальній записці після першого посилання на них. Підписи до рисунків розміщуються під рисунками. Підписи до таблиць над таблицями. Рисунки та підписи до них, а також таблиці розміщають по центру аркуша. Для підписів до таблиць використовують вирівнювання по правому краю.

У формулах в якості символів необхідно застосовувати лише позначення, встановлені відповідними стандартами. Значення символів і коефіцієнтів, що входять у формулу, наводять безпосередньо під формулою, з нового рядка в тій послідовності, в якій вони записані у формулі; після формули ставиться кома, а перший рядок розшифрування починається словами “де” без двокрапки; кожен рядок розшифрування закінчується крапкою з комою, а останній – крапкою.

Наприклад: мінімальну ширину резистора обчислюємо за формулою

$$W_p = \sqrt{\frac{\rho_s P}{R P_o}}, \quad (1)$$

де $\rho_s = 200 \text{ Ом}$ – поверхневий опір; $P = 0,5 \text{ Вт}$ – потужність розсіювання резистора; $R = 40 \text{ кОм}$ – номінальне значення опору; $P_o = 40 \text{ Вт/см}^2$ – допустима потужність розсіювання.

Якщо за однією формулою виконується декілька однакових обчислень, доцільно детальний розрахунок проводити один раз, а результати решти розрахунків представити у вигляді таблиць.

Всі формули пояснювальної записки повинні мати наскрізну нумерацію арабськими цифрами в круглих дужках, які проставляються по правому краю тексту. Вище й нижче кожної формули або рівняння потрібно залишити один порожній рядок.

Кожний розділ пояснювальної записки починається з нової сторінки і повинен мати порядковий номер, записаний арабськими цифрами, а також відповідний заголовок. Великі розділи необхідно розбивати на підрозділи з номерами та заголовками. Нумери підрозділів записуються перед заголовками і складаються з номера розділу, крапки та номера підрозділу. Номер підрозділу представляє собою порядковий номер підрозділу в межах даного розділу.

Пояснювальна записка повинна бути викладена чітко, ясно з обґрунтуванням обраних технічних рішень.

В список літератури включається література, якою студент користувався у процесі роботи і на яку в тексті пояснювальної записки є посилання. Літературні джерела вказуються в порядку їх використання у тексті. При цьому вказується прізвище та ініціали автора (авторів), назва книги або статті (назва журналу, рік видання, том, номер), місце видання, видавництво та рік видання. Допускаються загальноприйняті скорочення найменувань журналів, видавництв, міст. Іноземні роботи приводяться у оригінальній транскрипції.

Закінчена та підписана студентом робота здається керівнику не пізніше, ніж за 5 днів до захисту курсової роботи. При необхідності робота може бути повернена студенту для доробки.

Якщо в ході перевірки роботи виявиться, що студент виконав роботу не самостійно, то йому видається повторне завдання.

Студент захищає роботу перед комісією в складі керівника роботи та членів комісії, призначених завідуючим кафедрою.

При захисті роботи студент повинен проаналізувати запропоновану схему, пояснити вибір технології та відповісти на питання членів комісії.

На доповідь відводиться п'ять хвилин.

ДОВІДКОВІ ДАНІ

Таблиця 1 – Фізичні константи

| Константа | Числове значення |
|---|-----------------------|
| Стала Больцмана k , Дж · К ⁻¹ | $1,38 \cdot 10^{-23}$ |
| Стала Планка h , Дж · с | $6,63 \cdot 10^{-34}$ |
| Стала Планка редукована $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, Дж · с | $1,05 \cdot 10^{-34}$ |
| Заряд електрона q , Кл | $1,6 \cdot 10^{-19}$ |
| Маса електрона m_0 , кг | $0,91 \cdot 10^{-30}$ |
| Маса протона M , кг | $1,67 \cdot 10^{-27}$ |
| Швидкість світла у вакуумі c , см · с ⁻¹ | $3 \cdot 10^{10}$ |
| Електрична стала ϵ_0 , Ф · см ⁻¹ | $8,85 \cdot 10^{-14}$ |
| Електрон-вольт 1 еВ, Дж | $1,6 \cdot 10^{-19}$ |
| Температурний потенціал ($T = 300$ К) φ_T , В | 0,026 |
| Довжина хвилі фотона з енергією 1 еВ λ , мкм | 1,24 |

Таблиця 2 – Основні параметри напівпровідникових матеріалів

| Параметр | Ge | Si | GaAs |
|--|---------------------|---------------------|----------------|
| Відносна діелектрична проникність | 16 | 12 | 13 |
| Концентрація n_i , см ⁻³ при $T = 300$ К | $2,5 \cdot 10^{13}$ | $1,5 \cdot 10^{10}$ | $2 \cdot 10^6$ |
| Рухливість електронів μ_n , см · В ⁻¹ · с ⁻¹ при $T = 300$ К | 3800 | 1300 | 8500 |
| Рухливість дірок μ_p , см · В ⁻¹ · с ⁻¹ при $T = 300$ К | 1800 | 500 | 450 |
| Коефіцієнт дифузії електронів D_n , см ² /с | 99 | 34 | - |
| Коефіцієнт дифузії дірок D_p , см ² /с | 47 | 13 | - |

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Технологічні основи виготовлення елементів напівпровідникових інтегральних мікросхем: конспект лекцій / укл. І. П. Бурик. – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 65 с.
2. Методичні вказівки до курсового проектування з курсу “Твердотільна електроніка-2” / для підготовки бакалаврів за напрямком 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка»/ Укл. Ільченко В.І., Королевич Л.М., Коваль В.М. – Київ, 2014. – 52 с.
3. Опанасюк Н. М. Технологічні основи електроніки: навч. посіб. / Н.М. Опанасюк, А.М. Чорноус. – Суми: Сумський державний університет, 2013. – 102 с.
4. Борисов О. В. Основи твердотільної електроніки: навч. посіб. – К.: Освіта України, 2011. – 462 с.
5. Борисенко, О. А. Курс лекцій з дисципліни "Твердотіла електроніка" / О. А. Борисенко, О. М. Кобяков, А. І. Новгородцев. – Електронне видання каф. комп'ютерних систем управління. – 2011. – 280 с.
6. Дружинін А. О. Твердотільна електроніка. Фізичні основи і властивості напівпровідникових приладів: навч. посіб. / А.О.Дружинін. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2009. – 328 с.
7. Моделювання технології та ІМС: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів факультету електроніки всіх форм навчання / уклад. О. В. Мачулянський, Д. Д. Татарчук. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – 32 с.
8. Хомяк В. В. Технологічні основи електроніки: навч. посіб. / В.В. Хомяк, Чернівецький нац. ун-т. – Чернівці: Рута, 2008. – 303 с.
9. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособ. для вузов / И.П. Степаненко. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 488 с.

10. Васильева Л. Д. Напівпровідникові прилади: підручник / Л. Д. Васильева, Б. І. Медведенко, Ю. І. Якименко. – К.: Кондор, 2003. – 388 с.
11. Барыбин А. А., Сидоров В. Г. Физико-технологические основы электроники. – СПб.: Издательство «Лань», 2001. – 272 с.
12. Интегральные микросхем и основы их проектирования: Учебник для техникумов / И.М. Николаев, Н.А. Филинук. – М.: Радио и связь, 1992. – 424 с.
13. Березин А. С. Технология и конструирование интегральных микросхем: Уч. пособие для студ. вузов по спец. "Физика и технология материалов и компонентов электронной техники" и "Микроэлектроника и полупроводниковые приборы" / А. С. Березин, О. Р. Мочалкина. – М.: Радио и связь, 1992. – 320 с.
14. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. Под ред. В.А. Терехова. – М.: Высш. Шк., 1991. – 351 с.
15. Аваев Н. А. Основы микроэлектроники: учеб. пособ. для радиотехн. спец. вузов / Н. А. Аваев, Ю. Е. Наумов, В. Т. Фролкин. – М.: Радио и связь, 1991. – 287 с.
16. Д.В. Игумнов, Г.В. Королев, И.С. Громов Основы микроэлектроники. – М.: Высш. шк., 1991. – 254 с.
17. Автоматизация проектирования БИС. В 6 кн.: Практ. пособие. Кн. 5. В.Я. Кремлев. Физико-топологическое моделирование структур элементов БИС/Под. ред. Г.Г. Казеннова. – М: Высш. шк., 1990. – 144 с.
18. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники: учеб. пособ. Кн. 8.: Литографические процессы / Мартынов В. В., Базарова Т. Е. – 1990. – 126 с.
19. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники: учеб. пособ. Кн.3: Полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / Ю. И. Горбунов, И. Я. Козырь. – 1989. – 142 с.

20. Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем: Учеб. Пособие для спец. "Физика и технология материалов и компонентов электронной техники". – М.: Высш. школа, 1989. – 320 с.
21. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники: учеб. пособ. Кн. 2: Материалы / А. И. Курносов. – М.: Высшая школа. – 1989. – 95 с.
22. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники: учеб. пособ. Кн. 1: Общая технология / И. Я. Козырь, Ю. И. Горбунов, Ю. С. Чернозубов, А. С. Пономарев. – М.: Высшая школа. – 1989. – 223 с.
23. Коледов Л. А.. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок: учеб. для вузов по спец. "Конструирование и технология электро-вычислительных средств" и "Конструирование и технология РЭС" / Л. А. Коледов. – М.: Радио и связь, 1989. – 399 с.
24. Автоматизация проектирования технологических процессов изготовления БИС: Учеб.пособие / А.И. Петренко, Ю.С. Синекон, Э. Бонат, М.Б. Погребинский. – К.: УМК ВО, 1988. – 188 с.
25. Бондарь Б. Г. Основы микроэлектроники: уч. пособ. для студ. вузов по спец. "Радиотехника" и "Многоканал. электросвязь" / Б. Г. Бондарь. – К.: Вища шк., 1987. – 309с.
26. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров: учеб. для студ. вузов по спец. "Конструирование и производство ЭВА", "Конструирование и производство радиоаппаратуры" / В. Н. Черняев. – М.: Радио и связь, 1987. – 464 с.
27. Пирс К., Адамс А., Кац Л., Цай Дж., Сейдел Т., Макгиллис Д. Технология СБИС: В 2-х кн. Кн.1 Пер. с англ./ под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 404 с.

28. Курносов А. И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: учеб. пособ. для вузов по спец. "Полупроводники и диэлектрики" и "Полупроводниковые приборы" / А. И. Курносов, В. В. Юдин. – М.: Высшая школа, 1986. – 368 с.
29. Польский Б.С. Численное моделирование полупроводниковых приборов. Рига: Зинатне, 1986. – 168 с.
30. Колобов Н.А. Основы технологии электронных приборов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1980. – 288 с.
31. Интегральные схемы на МДП-приборах. Пер. с англ. / Под ред. И.Н. Кармазинского. – М.: Мир, 1975 – 368 с.